SCIENCES ET AVENIR HORS-SÉRIE N° 200 JANVIER / FÉVRIER 2020 - UNE NOUVELLE HISTOIRE DU COSMOS

HORS-SÉRIE
SCIENCES ET AVENIR

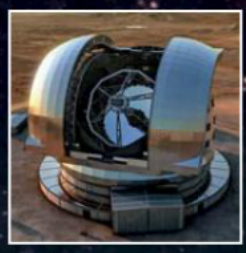
MICHEL MAYOR
PRIX NOBEL DE PHYSIQUE 2019
« Comparée à tous les autres objets célestes, la Terre est un paradis ! » p. 36

UNE NOUVELLE HISTOIRE DU COSMOS

Dernières découvertes dans le Système solaire
p. 74

Sommes-nous seuls dans l'Univers ?
p. 30

Boson de Higgs et matière noire
p. 71



Des télescopes tournés vers le Big Bang
p. 51

N° 200 JANVIER / FÉVRIER 2020 - ALLEMAGNE : 7.50 € / AUTRICHE : 5.90 € / BELGIQUE : 5.70 € / CANADA : 8.99 $CAN / ESPAGNE : 5.80 € / GRÈCE : 5.80 € / ITALIE : 5.80 € / LUXEMBOURG : 5.70 € / MAROC : 59.00 MAD / TOM SURFACE : 760 XPF / TOM AVION : 1500 XPF / PORTUGAL : 5.80 € / SUISSE : 8.80 CHF / TUNISIE : 8.50 TND / DOM - RÉUNION 5.70€

AFP, ROBERT GENDLER, NASA, D. FLORENTZ, LUCASTAYLOR/CERN, ESO

M 02597 - 200H - F: 5,50 € - RD

CROISIÈRE **SPÉCIALE ÉCLIPSE**

Patagonie et Terre de Feu

Chili - Malouines - Uruguay - Argentine

Du 1er au 19 décembre 2020

Éclipse solaire le 14 décembre

Parc national Torres del Paine - Chili

Jean-Pierre Luminet
Astrophysicien et écrivain

Pierre-Jean Furet
Historien

Le Coral Princess

Embarquez à bord du *Coral Princess* vers les terres mythiques de la **Patagonie**. Assistez au spectacle rare et magique de l'**éclipse solaire** prévue le 14 décembre* au large de l'Argentine qui vous sera commentée par **Jean-Pierre Luminet**, astrophysicien et émerveillez-vous devant la faune et les paysages splendides des pays traversés, de l'**Argentine** au **Chili** en passant par, les **îles Malouines**, **Ushuaia**, le **détroit de Magellan** et le **cap Horn**.

Possibilité d'effectuer un pré-séjour à l'Île de Pâques ou dans le désert d'Atacama.

OFFRE SPÉCIALE - **500 €/pers.** pour toute réservation avant le 31 janvier 2020 (code REVE)

soit la croisière à partir de ~~5 490 €~~ **4 990 €/pers.**** au départ de Paris à bord du *Coral Princess*

* Vols aller et retour en classe économique depuis Paris, pension complète (hors boissons), conférences et taxes inclus.
Départ de province possible : nous consulter.

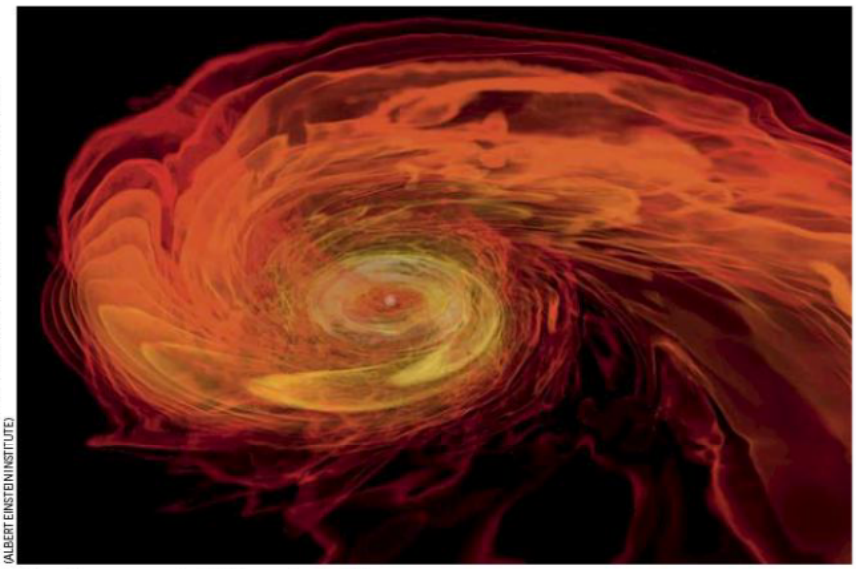
Demandez la brochure au **01 75 77 87 48**, par e-mail à **contact@croisieres-exception.fr**, sur **www.croisieres-exception.fr/brochures** (code **SCAPA** à renseigner) ou chez votre agence de voyages habituelle.

Manchots papous - Argentine

Croisières d'exception
S'enrichir de la beauté du monde

* Si les conditions météorologiques le permettent. ** Se référer à la brochure pour le détail des prestations et les conditions générales de vente. Licence n° IM075150063. Les conférenciers seront présents sauf en cas de force majeure. Création : nuitdepleinelune.fr - Photos : © AdobeStock, © Holland America Line et © Croisières d'exception.

Sommaire

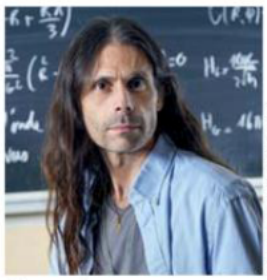


BRUNO GIACOMAZZO & LUCIANO REZZOLLA (MAX PLANCK INSTITUTE FOR GRAVITATIONAL PHYSICS (ALBERT EINSTEIN INSTITUTE)

À la découverte de l'Univers invisible P. 43

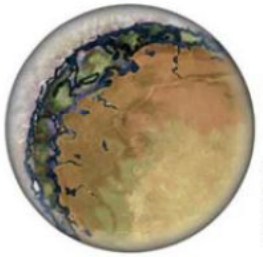
NASA, ESA, HUBBLE

L'Univers, toute une histoire ! P. 11



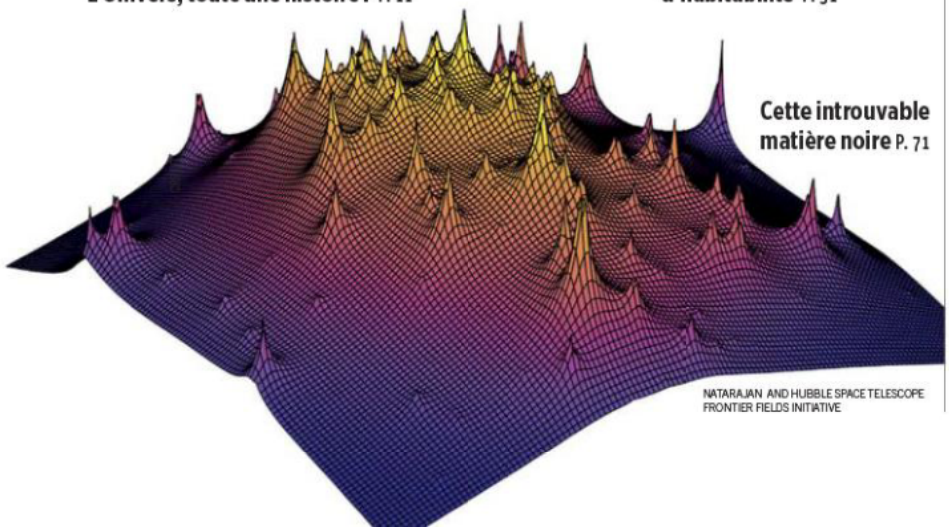
PHILIPPE SCHULLER/SIGNATURES

Rencontre : Aurélien Barrau P. 6



RARE EARTH/DR

Exoplanètes : en quête d'habitabilité P. 31



NATARAJAN AND HUBBLE SPACE TELESCOPE FRONTIER FIELDS INITIATIVE

Cette introuvable matière noire P. 71

5 **Édito**

6 **RENCONTRE**
Aurélien Barrau : « Il n'est pas exclu que des révolutions adviennent »

10 **LES PREMIERS INSTANTS**
11 L'Univers, toute une histoire !
16 La brûlante question de l'expansion
19 **INTERVIEW** Françoise Combes « Le modèle cosmologique en vigueur doit être remis en cause »
20 Les trublions de la cosmologie

23 **CAHIER REPÈRES**
24 Où sommes-nous dans l'Univers ?
26 Quel est l'âge de l'Univers ?
28 Qu'y a-t-il dans l'Univers ?

30 **SOMMES-NOUS SEULS DANS L'UNIVERS ?**
31 Exoplanètes : en quête d'habitabilité
36 **INTERVIEW** Michel Mayor « La Terre est un paradis comparée à tous les objets célestes que nous connaissons ! »
39 Le silence assourdissant des extraterrestres

42 **LES NOUVEAUX MESSAGERS DU COSMOS**
43 À la découverte de l'Univers invisible
47 **INTERVIEW** Thibault Damour « Nous allons pouvoir approfondir notre connaissance des trous noirs »
48 Ces mystérieux flashs venus des confins de l'espace
51 Télescopes : le temps des géants
54 On a créé une étoile !

58 **PORTFOLIO** Inspirations cosmiques

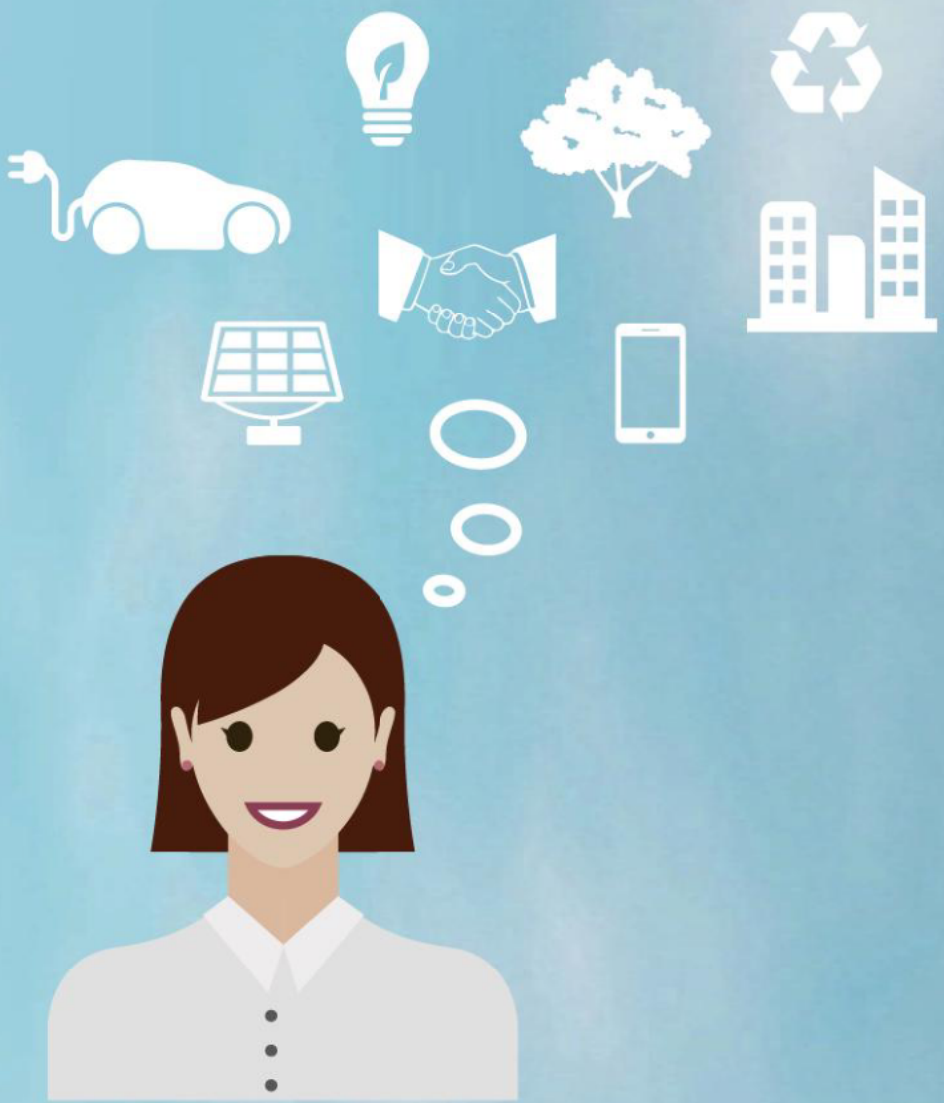
64 **COMMENT EST NÉE LA PREMIÈRE ÉTOILE ?**
65 Et des soleils se mirent à briller
70 **INTERVIEW** James Peebles « Ce qui semblait inimaginable a maintes fois fini par être observé ! »
71 Cette introuvable matière noire

74 **QUOI DE NEUF DANS LE SYSTÈME SOLAIRE ?**
75 Un Système unique en son genre
81 **INTERVIEW** Philippe Lognonné « Mars, seule planète où l'homme peut se projeter »

82 **LA PAGE WEB**

ENTREPRISES, COLLECTIVITÉS, FINANCEZ VOS BESOINS DE RECHERCHE,

DANS LES DOMAINES DES PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES, DES SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA VIE, DES SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES



Dans le cadre d'un partenariat entre un étudiant, son laboratoire d'accueil et vous, l'ADEME vous aide à produire des connaissances nouvelles et renforce les capacités humaines de votre R&D en finançant un doctorant pendant 3 ans !

ENSEMBLE POUR CONSTRUIRE UN MONDE PLUS DURABLE

www.ademe.fr/theses

ADEME
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

Liberté · Égalité · Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

CONCEPTION & RÉALISATION GRAPHIQUE OLFA NEMSI

HORS-SÉRIE
SCIENCES ET AVENIR

41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.00.
Fax : 01.55.35.56.04.
redaction@sciencesetavenir.fr

Directrice de la rédaction
Dominique LEGLU 56.02
Rédaction en chef Vincent REA 56.35
avec Florence LEROY 56.36
Directrice artistique Thalia STANLEY 56.21
Photo-iconographie Andreina DE BEI
(rédactrice en chef adjointe) 56.31
Isabelle TIRANT 56.32
Documentation Astrid SAINT AUGUSTE 56.48
Collaborateurs
Franck DANINOS, Azar KHALATBARI,
Sara de LACERDA, Sylvie ROUAT
Ont collaboré à ce numéro
Jacques-Olivier BARUCH, Mehdi BENYEZZAR,
Pierre CARRIL, René CUILLIERIER, Denis DELBECQ,
François FOLLIET, Jean-François HAÎT,
Hélène LE MEUR, Pierre VANDEGINSTE
Pour joindre la rédaction
01 55 35 56 00 – redaction@sciencesetavenir.fr
Courrier des lecteurs
courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel de la REBERDIÈRE 56.06
Comptabilité Mélanie BENKHEDIMI 56.14
Assistante de direction Valérie PELLETIER 56.01

Abonnements et anciens numéros : 01.55.56.71.48
4, rue de Mouchy – 60438 Noailles Cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Publicité Médiaobs
44 rue Notre-Dame-des Victoires 75002 Paris
Tél. : 01.44.88.97.70 / Fax : 01.44.88.97.79
Pour joindre votre correspondant par téléphone, composez le 01.44.88 suivi des 4 chiffres qui figurent à la suite de son nom ; pour adresser un email à votre correspondant, l'initiale de son prénom puis son nom suivi de @mediaobs.com.
Directrice générale Corinne ROUGÉ 93.70
assistée de Marie-Noëlle MAGGIES 93.70
Directeur de publicité
Sylvain MORTREUIL 97.75
Responsable Web Romain COUPRIE 89.25
Assistante commerciale Séverine LECLERC 39.75
Exécution Nicolas NIRO 89.26
Administration des ventes Caroline HAHN 97.58
Ventes
Directeur commercial
Jean-Claude ROSSIGNOL 01.44.88.35.40
Directeur des ventes Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
01.55.35.56.62 assisté de Lina QUACH 56.63
Relations extérieures
France ROQUE 01.44.88.35.79
Sciences et Avenir SARL
Gérance : Claude PERDRIEL
Directeur de la publication : Claude PERDRIEL
Les abonnements et réabonnements doivent être adressés à Sciences et Avenir, Service abonnements, CS 90006 - 59718 Lille Cedex 9. Tél. : 03.28.38.47.69. Tarif des abonnements : France, 1 an simple (12 numéros) : 35 €. 1 an complet (12 numéros + 4 hors-série) : 48 €. Tarifs pour les pays étrangers sur demande.
Multimédia : Sciences et Avenir, 41 bis avenue Bosquet, 75007 Paris. Tél : 01.55.35.56.00.
Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement.
Copyright Sciences et Avenir.
Commission paritaire n° 0620K79712.
Distribué par Presstalis.
Photogravure : Éric BACQUET
Fabrication : Christophe PERRUSSON

PEFC 10-31-1557
Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
pefc-france.org

Origine du papier : Allemagne
Taux de fibres recyclées : 0%
Eutrophisation : PTot = 0,016 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Rotofrance Impression, certifié PEFC

ACPM OJD

Édito

2008/MILOSLAV DRLICKMÜLLER, PETER ANIOL, MARTIN DIETZEL, VOJTECH RUSIN

La couronne solaire vue pendant une éclipse totale.

Horizons cosmiques

La première chose à savoir sur mon objet d'étude, le Big Bang, c'est que son nom n'est pas correct ! », lançait James Peebles en novembre dernier à Washington, devant un auditoire pour le moins médusé. On sait que l'expression est à manipuler avec des pincettes puisqu'elle désigne – qu'on se le dise une fois pour toutes – non pas une explosion originelle, mais l'état dense et chaud de l'Univers il y a environ 13,8 milliards d'années. Récompensé quelques jours plus tôt par le prix Nobel, le physicien canadien, invité dans nos pages, expliquait ainsi que la cosmologie ne dispose d'aucun « test solide » pour valider les théories concernant les événements des toutes premières fractions de seconde de l'Univers. Faut-il pour autant jeter le bébé avec l'eau du bain primordial ? Bien sûr que non. Si l'instant zéro se dérobe encore et toujours, en ce qui concerne la suite, les découvertes se succèdent en effet à un rythme astronomique !

Notre précédent hors-série consacré à l'histoire du Cosmos remonte à… 2009. Dix ans. Cette décennie a vu déferler les ondes gravitationnelles, fascinantes vagues de l'espace-temps soulevées par la fusion des trous noirs ; s'allumer les sursauts radio rapides, des flashs cent fois plus brillants que tout autre signal céleste ; sans oublier les cartes du satellite Planck, immortalisant le fonds diffus cosmologique avec une précision inédite. Le regard tourné vers l'aube cosmique, les astronomes comptent bien, désormais, dater le moment où les premières étoiles se sont allumées.

Une autre quête est celle de la vie extraterrestre. On a trouvé, il y a quelques mois, de la vapeur d'eau dans l'atmosphère d'une exoplanète orbitant à une distance raisonnable de son astre. Et la machine à fantasmes s'est emballée. Gardons les pieds sur Terre, nous dit en substance l'astronome suisse Michel Mayor, co-lauréat du Nobel de physique avec son compatriote Didier Queloz et James Peebles, cité plus haut. Ce n'est pas parce qu'on y trouve de l'eau que ces planètes abritent de la vie. Lui qui a scruté tant d'horizons lointains nous invite avant tout à prendre soin de la nôtre : « *La Terre est un paradis, comparée à tous les objets célestes que nous connaissons.* »

Le Cosmos offre de quoi se réjouir, donc. Un problème cependant, et non des moindres : le modèle standard, qui semble si bien décrire l'Univers et son évolution, continue de se fracasser sur deux grandes énigmes nommées matière noire et énergie noire. Les chercheurs courent après la première depuis plus de quarante ans, et la nature de la seconde demeure insaisissable. Alors, les certitudes vacillent. Ce modèle, faudra-t-il l'amender à la marge ou le repenser totalement ? « *Des révolutions peuvent encore advenir* », annonce l'astrophysicien Aurélien Barrau, spécialiste de la gravitation quantique, en ouverture de ce numéro. « *Maintes fois ce qui était inimaginable a fini par être observé* », conclut James Peebles. À n'en pas douter, dans dix ans, nous aurons suffisamment de matière pour écrire une nouvelle histoire !

VINCENT REA

Rencontre

AURÉLIEN BARRAU, astrophysicien

« Il n'est pas exclu que des révolutions adviennent… »

Malgré de magnifiques avancées comme la détection d'ondes gravitationnelles ou d'exoplanètes, notre description de l'Univers comporte encore de nombreuses énigmes, explique l'astrophysicien. Comment les résoudre ? Par l'audace !

Aujourd'hui, peut-on raconter l'histoire de l'Univers sans craindre de se tromper ?

Je serais enclin à dire qu'on connaît mieux l'histoire de l'Univers que celle de la Terre ! On parvient à estimer l'âge du Cosmos avec quatre chiffres significatifs : 13,79 milliards d'années, à 20 millions d'années près seulement. Et l'on peut comprendre de façon précise comment sont apparus les particules élémentaires, puis les noyaux, les atomes, les grandes structures, les étoiles, les trous noirs, les planètes, les galaxies, la chimie, la complexité… Des calculs corroborés par une profusion de magnifiques observations : le satellite Cobe nous a montré le fond diffus cosmologique, la plus ancienne image de l'Univers, précisée par la suite par l'observatoire WMap et la mission Planck… Et deux théories convergent remarquablement pour expliquer cette histoire, d'une part la relativité générale d'Einstein qui s'applique à l'Univers, de l'autre le modèle standard de la physique des particules qui s'intéresse à l'infiniment petit. L'expansion de l'Univers, par exemple, est un acquis, qui a presque le même niveau de certitude que la rotondité de la Terre.

> « Toute cette matière autour de nous ne devrait pas être là. Notre simple présence est un défi à la physique ! »

Il n'est cependant pas exclu que des révolutions adviennent encore en cosmologie, parce que cette description de l'Univers n'est pas assise sur des piliers conceptuels parfaitement clairs – par exemple, nous ne disposons pas de théorie physique adéquate pour décrire les tout premiers instants. Le modèle est grevé par un certain nombre d'incohérences internes…

Lesquelles ?

C'est tout simplement la quasi-totalité du contenu de l'Univers qui nous échappe ! D'abord la matière noire, cette masse invisible dont l'existence est indispensable pour rendre compte de nombreux phénomènes. Depuis des décennies, tous les candidats théoriques imaginés restent introuvables. Quant à la question de l'énergie noire, elle stagne. Pourtant, celle-ci interviendrait à hauteur de presque 70 % du contenu énergétique de l'Univers. Elle est censée rendre compte du fait que l'expansion de celui-ci – fait bien compris – va de plus en plus vite. Et puis, il y a le problème de notre existence… Le modèle cosmologique standard suppose qu'aux premiers instants, il s'est créé pratiquement autant de matière que d'antimatière, qui auraient dû s'annihiler pour l'essentiel. Par conséquent, toute cette matière autour de nous ne devrait pas être là. Notre simple présence est un défi à la physique ! Enfin, il reste une énorme inconnue : que s'est-il passé juste à l'instant 0 ? Voilà un certain nombre d'éléments étranges dont on ne sait pas si l'on va les résoudre, patiemment, un par un, ou s'ils disparaîtront simultanément dans une véritable révolution.

Que faut-il faire pour venir à bout de cette énigme ?

Quand j'étais jeune, j'avais tendance à penser qu'il fallait investir surtout dans des instruments ou des projets destinés à résoudre les questions les plus fondamentales, mais j'ai changé mon fusil d'épaule. C'est rarement en prenant les choses de front qu'on obtient des résultats. Par exemple, cela fait un siècle que les plus grands esprits se frottent à la gravitation quantique, mon domaine de recherche, qui devrait, en unifiant la théorie de la relativité générale avec la physique quantique, permettre de décrire précisément les premiers instants de l'Univers. Mais aucune solution consensuelle n'a été trouvée. Et il est très probable qu'on n'atteindra jamais expérimentalement l'échelle de Planck à laquelle elle se manifeste. Je crois que nous résoudrons l'énigme en regardant ailleurs, avec un peu de chance et beaucoup d'imagination. ●●●

Aurélien Barrau

Chercheur au Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie à l'université de Grenoble, spécialiste de cosmologie et d'astrophysique des hautes énergies

Derniers ouvrages parus :
Le Plus Grand Défi de l'histoire de l'humanité, Michel Lafon, 2019

De la vérité dans les sciences, Dunod, 2019

Big Bang et au-delà. Les Nouveaux Horizons de l'Univers, Dunod, 2019

Blog : Cosmogonies, https://blogs.futura-sciences.com/barrau/

●●● C'est vraiment là, aujourd'hui, qu'il faut faire porter nos efforts : trouver des idées décalées pour découvrir des nouveautés inattendues. Par exemple, l'effet de la gravité quantique est minuscule à basse énergie, mais si on le multiplie par un nombre gigantesque, soit dans le temps, soit dans l'espace, soit sur la quantité de particules, il est possible qu'on arrive à le mesurer.
En réalité, nous sommes face à une crise ontologique de la cosmologie : ce qu'on a appris ces dernières décennies, c'est que les modèles marchent trop bien ! C'est la grande découverte de l'expérience Planck. Mais ils fonctionnent en termes de capacité à prévoir, pas d'explication ultime. Peut-être devons-nous nous autoriser à changer drastiquement de cadre, au moins à titre expérimental.

L'une des découvertes de ces dernières années a été celle des ondes gravitationnelles, ces minuscules déformations du tissu de l'espace-temps prédites par la théorie de la relativité générale d'Einstein, par l'interféromètre Ligo…
Mais il est faux de dire qu'il s'agit d'une découverte ! Comme vous le savez, Russell Hulse et Joseph Taylor avaient « vu », il y a quarante-cinq ans, un système binaire d'étoiles à neutrons perdre de l'énergie en émettant des ondes gravitationnelles. Cela leur a même valu le prix Nobel en 1993. Il est également faux de dire que c'est la première fois qu'elles ont été directement observées : « direct » ne veut pas dire grand-chose. Entre le changement de période orbitale d'un système binaire (la découverte initiale) et la variation de contraste de frange noire d'un interféromètre (la mesure récente), qu'est-ce qui est le plus direct ?
Il faut louer l'expérience Ligo pour de bonnes raisons : ce qu'elle a de formidable, c'est qu'elle ouvre une nouvelle astrophysique. En termes de sonde sur l'Univers, je crois que c'est Hubert Reeves qui a été le premier à utiliser cette analogie, c'est comme si nous avions un nouveau sens après la vue ou l'ouïe, un sens géométrique : nous allons pouvoir observer des vibrations de l'espace, et ces vibrations vont nous révéler de nouveaux objets physiques. Platon invitait à scruter l'Univers avec des yeux de géomètre. Nous voilà platoniciens !
Et puis c'est beau, émouvant même, parce que c'était un peu mission impossible. Dans cette affaire, il y a le génie d'Einstein, évidemment, mais aussi celui des expérimentateurs. Il faut leur rendre hommage. Vous vous rendez compte, détecter ces vibrations revient à mesurer un déplacement du miroir de l'interféromètre d'une distance considérablement plus petite que celle d'un noyau d'atome.

Que va-t-on voir grâce à cet « arpenteur de l'Univers » ?
Il a déjà permis une petite révolution en astrophysique : il n'était pas du tout prévu qu'il y ait autant de trous noirs ayant une masse de quelques dizaines de fois celle du Soleil. Et, dans mon domaine, les ondes gravitationnelles pourraient nous permettre de voir de petites modifications de la structure des trous noirs dues à la gravité quantique.

Quelle autre avancée a marqué ces dernières années ?
La multiplication de la découverte d'exoplanètes est aussi une chose très réjouissante. Naïvement, je crois que la probabilité que de la vie apparaisse à partir de matière inerte est proche de zéro. Mais s'il y a énormément d'exoplanètes, on multiplie cette probabilité quasi nulle par un nombre extraordinairement grand. Et là, tout devient possible !
En même temps, tout cela est paradoxal. Nous sommes fascinés, et à raison, par la vie extraterrestre, alors que nous n'avons pratiquement pas commencé à vraiment regarder la vie terrestre. Si nous découvrions des insectes sur Mars, cela ferait la une de tous les journaux. Mais ils sont ici et on les écrase.

Comment la découvrir, cette vie extraterrestre ?
Il faut d'abord définir ce qu'est la vie ! Nous avons une définition – en extension – qui nous permet à nous, les lapins, les rats et les microbes de faire partie des vivants, et qui exclut les pierres et les tables. Mais elle est faite pour coller avec notre observation de ce qu'est la vie autour de nous. De ce fait, quand on pose la question : « y a-t-il de la vie ailleurs dans l'Univers ? », on demande en fait : « y a-t-il la même forme de vie que celle que nous connaissons ? ». Il faudrait un concept de vie permettant d'intégrer une authentique altérité.
Quant à découvrir des marques de sa présence… L'eau semble indispensable, mais l'ammoniac ne pourrait-il jouer le même rôle ? Le carbone semble indispensable, mais le silicium ne pourrait-il jouer le même rôle ? On peut aller plus loin : la vie est un processus adaptatif, qui donc, par définition, peut nous surprendre dans sa forme. La détecter va être compliqué. Mais ne renon-

AURÉLIEN BARRAU
MON ŒUVRE D'ART PRÉFÉRÉE

« J'aurais tendance à dire qu'il vaut mieux ne pas choisir, et travailler à faire fonctionner en tant qu'art un large pan du réel, à la manière de l'exhortation du poète allemand Hölderlin : *"Il faut habiter poétiquement cette Terre"*. Au sens d'un authentique acte de résistance, puisque le poétique, c'est la rigueur, la précision et le courage. Mais, s'il fallait vraiment choisir, ce serait l'un des outrenoirs du peintre Pierre Soulages : selon la manière dont on les contemple, on peut se trouver face à une obscurité radicale ou, en déplaçant un peu le regard, être littéralement innervé de lumière. Un peu comme la pensée : au cœur du plus sombre, il suffit d'un infime pour qu'une déferlante de teintes diaprées vienne irriguer les possibles. L'art n'est pas, disait Ionesco, une *"récréation dominicale"*, mais une exigence. »

CENTRE POMPIDOU, MNAM-CCI, DIST. RMN-GRAND PALAIS / IMAGE CENTRE POMPIDOU, MNAM-CCI

çons pas… en gardant en tête que nous ne comprenons probablement qu'une infime partie du réel. Et demeurons humbles : notre « intelligence » n'est pas la seule possible.

À chaque fois qu'une exoplanète est repérée dans la zone habitable de son étoile et pas trop loin de nous, on se demande si l'on va pouvoir y aller…

D'abord, une remarque théorique. D'un point de vue purement mathématique, il n'y a pratiquement aucune limite aux voyages spatiaux, car en relativité le temps se dilate… Vu de l'extérieur, un vaisseau spatial allant presque à la vitesse de la lumière mettrait à peu près un million d'années pour rejoindre une planète située à un million d'années-lumière... quand ses occupants, eux, pourraient n'avoir vieilli que de dix ans.

Mais abordons plutôt la symbolique. Les missions Apollo avaient quelque chose d'un peu magique. Il y avait une appétence intellectuelle, un côté héroïque. Mais quand je vois Elon Musk, le patron de Tesla, mettre une voiture sur orbite, je trouve indécente et pathétique cette démonstration de puissance. Quel est le but ? Survivre quand la vie sur Terre sera détruite ? C'est totalement irrationnel. Il serait infiniment plus facile de renoncer à sa destruction que d'aller faire du « terraforming » sur Mars. Et quand bien même on y arriverait, huit milliards de personnes mourraient – et combien d'animaux ? – pour trois cents survivants… On n'a toujours pas compris les racines du mal, cette espèce d'hyperexpansionnisme qui a déjà détruit 60 % des populations d'animaux sauvages. Pour eux, il n'y aura pas de miracle : c'est fait, ils sont morts. À côté de cela, toutes les autres nouvelles sont anecdotiques.

À l'échelle du Cosmos, comment considérer la disparition de la vie sur cette planète unique, la Terre ?

Avec un géologue, nous nous sommes demandé si dans cent millions d'années, quelqu'un pourrait savoir que les humains ont existé. Naïvement, on pourrait penser que non : il ne restera rien de tous nos artefacts, cathédrales ou centrales nucléaires. Pourrait-on voir l'augmentation de CO_2 dans la glace ? Non : elle aura fondu. En revanche, les fossiles témoigneront d'un phénomène inédit : la disparition d'une très grande part des espèces, sans cause météoritique, sans cause géologique. Voilà la trace que l'humanité aura laissée dans l'Histoire : la disparition quasi instantanée des vivants.

Face à cela, que peut la science ?

Si l'on pense aujourd'hui, concernant le drame planétaire, que la solution est de trouver un miracle technologique, on se trompe complètement. On ne guérit pas de l'alcoolisme en augmentant les doses. Bien sûr, on peut trouver des astuces technologiques ponctuelles. La science est magnifique, et je l'aime passionnément. Mais elle n'est pas une vérité absolue. La science, c'est le doute, la déconstruction, le fragile. Ce n'est qu'une dimension du réel. Je suis las de l'arrogance occidentale, incapable de la moindre remise en cause. La science nous montre que la vie est en train de mourir sur Terre. Mais que fait-on de cette certitude ? C'est un problème éthique et politique. Quand bien même il y aurait une possibilité techno-scientifique de raser les forêts et de les remplacer par de gigantesques absorbeurs de CO_2, veut-on léguer ce monde-là à nos enfants ? Il est temps de faire preuve d'un peu de sérieux !

Il faut donc revoir notre rapport au monde ?

Oui, et drastiquement. Le plus important est de comprendre que tout ce que nous avons construit – au niveau des choses comme au niveau des valeurs – est réfutable, questionnable. Il faut réinventer la contingence. Aujourd'hui, ceux qui préfèrent leurs enfants à leur argent, ceux qui préfèrent sauver la vie plutôt que soutenir la croissance économique, passent pour des radicaux ou de doux dingues. C'est fou. Il est urgent et vital de tout remettre à plat. Et de défendre, en effet, la croissance – mais celle de l'amour, de la solidarité, du respect, de la créativité, de l'entraide, des recherches scientifiques et des explorations artistiques…

PROPOS RECUEILLIS PAR AZAR KHALATBARI ET FLORENCE LEROY
PHOTOS : PHILIPPE SCHULLER / SIGNATURES POUR SCIENCES ET AVENIR

Les premiers instants

DETLEV VAN RAVENSWAAY /SPL / COSMOS

L'Univers, toute une histoire !

Dans les années 1920, d'audacieux penseurs démontrent que l'Univers a un passé. Une théorie déduite de la relativité générale d'Einstein... mais si dérangeante qu'elle est combattue par le génial physicien lui-même !

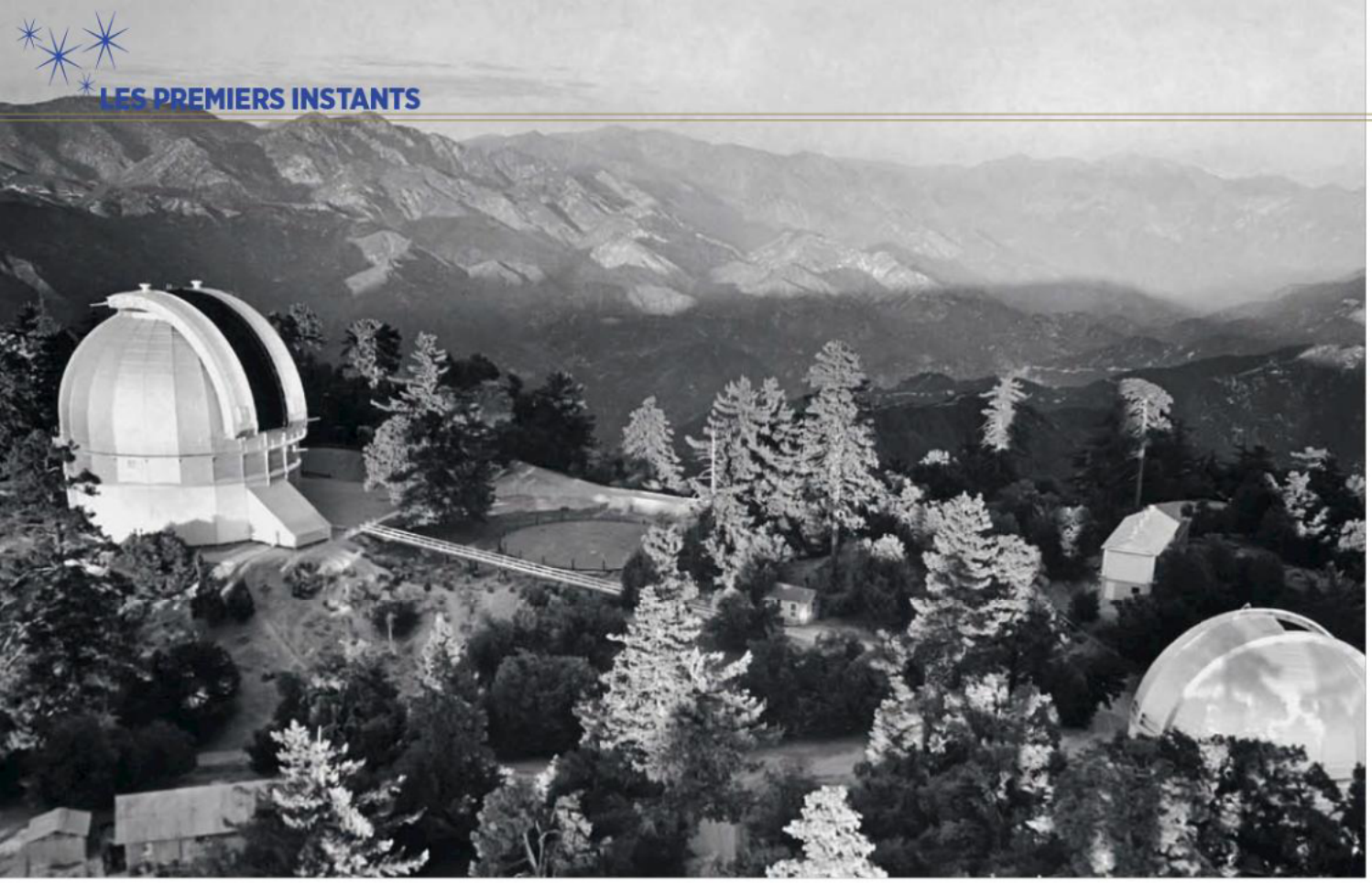
PAR AZAR KHALATBARI

Par temps clair, les habitants de Pasadena peuvent admirer, au loin, le majestueux dôme blanc de l'observatoire du Mont-Wilson. De la petite ville proche de Los Angeles jusqu'à la vénérable institution, la route serpente à travers les eucalyptus. Une fois passé la grille d'entrée et les immenses antennes de transmission, apparaît au loin la mégalopole, ses avenues à angle droit… et l'océan Pacifique, noyé dans un brouillard permanent.

Rares sont les visiteurs qui se détournent de cet époustouflant panorama pour s'aventurer entre les coupoles abritant l'observatoire et pénétrer sous la première d'entre elles, où une exposition permanente raconte l'histoire de l'institution. Les plus curieux poussent jusqu'au mythique dôme du télescope Hooker et gravissent l'étroit escalier menant à la salle d'observation, plaçant ainsi leurs pas – souvent sans le savoir – dans ceux d'Edwin Hubble (1889-1953), l'astronome qui a donné son nom au célèbre télescope spatial. En haut des marches, une salle au parquet ciré et, de l'autre côté d'une vitre en Plexiglas, l'incroyable machinerie mise en service en 1917, sur laquelle semble veiller la photo du célèbre astrophysicien assis, pipe posée près de lui, l'œil vissé au ●●●

Conférence de Jean-Pierre Luminet, « La découverte de l'expansion cosmique », www.youtube.com/watch?v=1emyA7qpKC0

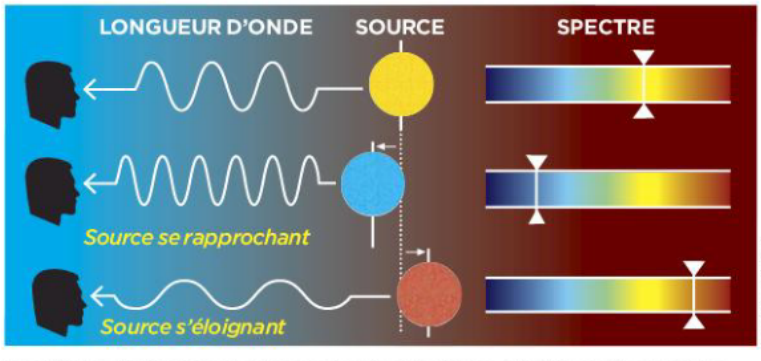
Jean-Pierre Luminet, *L'Invention du Big Bang*, Seuil, Point Sciences, 2014



M. BOURKE-WHITE / THE LIFE PICTURE COLLECTION / GETTY IMAGES

●●● télescope, réglant d'une main l'instrument. C'est dans ce lieu mythique que s'est écrite une grande partie de l'histoire de l'Univers. À la lumière des observations menées, au début du XXe siècle, par Edwin Hubble ici et par son collègue Vesto Slipher (1875-1969) à l'observatoire Lowell (près de Flagstaff, en Arizona), la communauté scientifique a dû admettre que l'Univers évoluait au cours du temps. Autrement dit, que le cosmos avait une histoire, et donc un âge ! Et que, contre toute attente, en accédant aux lois présidant à son évolution, les physiciens seraient en mesure de l'étudier dans sa globalité, bien au-delà des astres proches. Ainsi allait naître, au tournant des années 1930, la cosmologie scientifique.

C'est dans l'observatoire du Mont-Wilson, près de Los Angeles, que le cosmologiste Edwin Hubble a réalisé des observations qui ont changé l'histoire de de l'astronomie.



MEHDI BENYEZZAR

Lorsqu'un astre jaune se rapproche de l'observateur, sa lumière se décale vers les courtes longueurs d'onde (bleu). S'il s'éloigne de l'observateur, sa lumière rougit.

Pour comprendre l'importance des travaux menés au Mont-Wilson, il faut remonter en 1915, lorsqu'Albert Einstein élabore la relativité générale. Sa théorie indique que la masse courbe l'espace, et que cette courbure détermine le trajet de la lumière et le mouvement des astres. Très vite, elle marque des points : elle parvient, par exemple, à expliquer la trajectoire excentrique de la planète Mercure. Et la consécration ne tarde pas. En novembre 1919, l'astrophysicien britannique Arthur Eddington (1882-1944), qui a très tôt compris la relativité générale, se rend à Sao Tomé-et-Principe, dans le golfe de Guinée. Il entend profiter d'une éclipse solaire pour tester l'une des prédictions du modèle : la masse du Soleil courbe l'espace, faisant dévier la lumière d'une étoile passant à proximité, dont la position paraît ainsi décalée. Un effet qui ne peut être observé que pendant une éclipse totale, lorsque les étoiles deviennent visibles un court moment. Après examen de ses plaques photo au lendemain de l'événement, Eddington déclare la théorie bel et bien vérifiée. Des décennies plus tard, les historiens des sciences ne seront pourtant pas aussi catégoriques...

Malgré ce triomphe, rares sont à l'époque les physiciens qui comprennent cette théorie réputée complexe et se lancent dans la résolution exacte des équations de la relativité générale à l'échelle de l'Univers tout entier. Parmi ces audacieux, le Russe Alexandre Friedmann (1888-1925), alors profes-

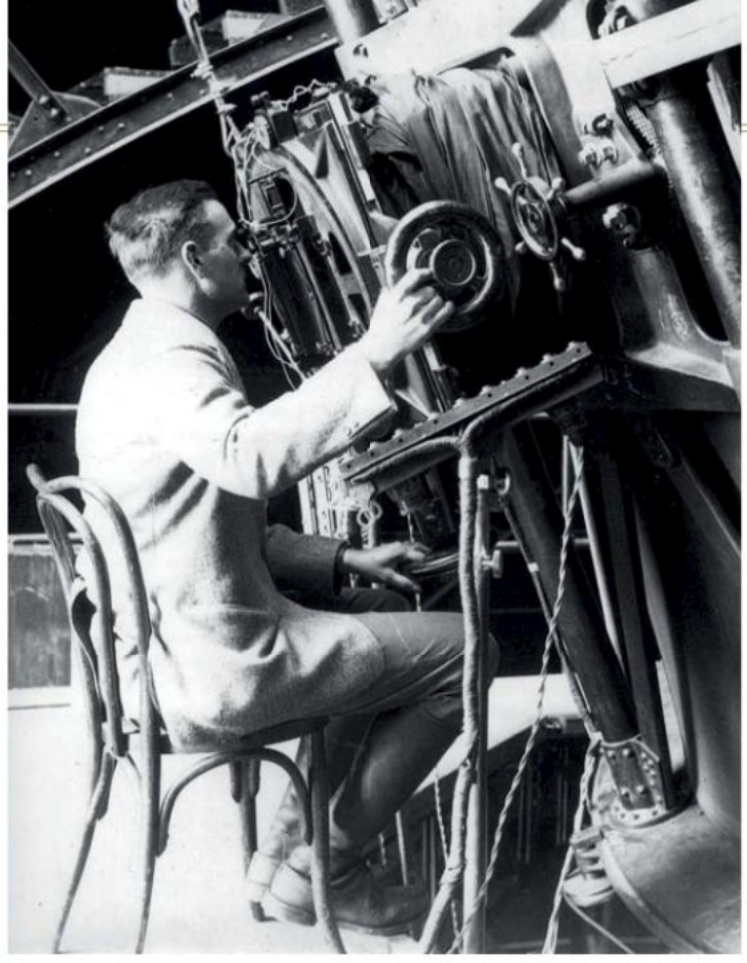


PHOTO12/ALAMY

Hubble a compris que les nébuleuses distantes qu'il observait étaient des galaxies. Ci-dessous, les trois artisans du Big Bang : Slipher, Friedmann et Lemaître.

LOWELL OBSERVATORY

Vesto Slipher

WIKIPEDIA PD

Alexandre Friedmann

ADOC-PHOTOS

Georges Lemaitre

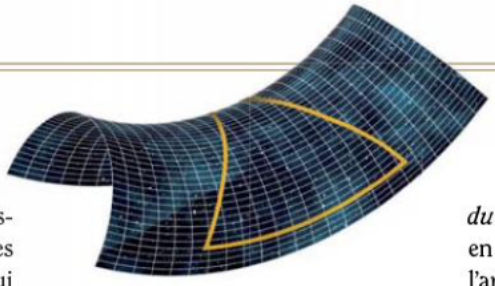
seur à l'université de Petrograd, et le chanoine belge Georges Lemaître (1894-1966), professeur à l'Université catholique de Louvain. Le premier s'y essaie en 1922, le second en 1927 – son article ne sera traduit en anglais que quatre ans plus tard. Ils ne fréquentent pas les mêmes milieux académiques, ne parlent pas la même langue… mais leurs résultats semblent converger sur un point : ils indiquent un Univers évoluant dans le temps. Une idée alors inacceptable ! Einstein lui-même ne parvient pas à l'admettre, même s'il reconnaît l'exactitude mathématique des travaux de Friedmann. Il va jusqu'à rajouter à ses équations une constante destinée à compenser cette variabilité temporelle. Ainsi arrangé, le résultat correspond à un univers statique…

Dans la communauté scientifique, les avis restent partagés : l'Univers est-il stable, comme le conçoit Einstein, ou en évolution, comme l'indiquent les travaux de Friedmann et Lemaître ? La réponse ne peut venir que du ciel. La théorie semble alors très en avance sur la pratique. Les instruments ne permettent pas de voir au-delà de notre propre galaxie, et la question fondamentale qui taraude les spécialistes est la suivante : les pâles nébulosités que l'on devine font-elles partie de la Voie lactée ou constituent-elles des galaxies indépendantes ?

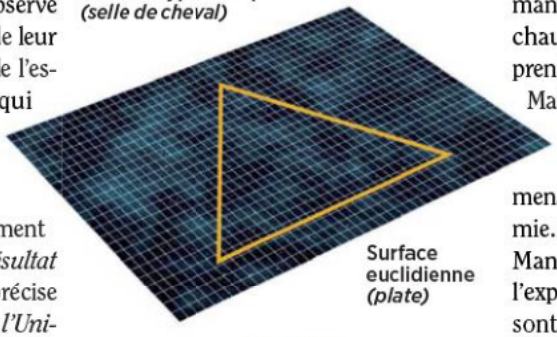
En 1924, la taille de l'Univers se voit subitement démultipliée !

C'est précisément à cette question que répond Hubble. À son retour de France – où il se trouvait engagé dans le premier conflit mondial –, il avait rejoint l'observatoire du Mont-Wilson, qui abritait alors le plus puissant télescope du monde. Ses premiers travaux, publiés en 1924, donnent le vertige : chacune de ces nébuleuses est une galaxie en soi, un monde riche en étoiles et en gaz, situé bien au-delà de la Voie lactée. La taille de l'Univers se voit subitement démultipliée !

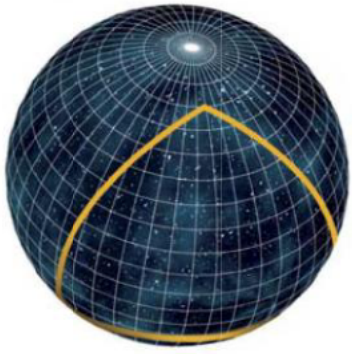
Or, depuis 1915, l'astronome Vesto Slipher avait observé de son côté un phénomène qui allait se révéler déterminant pour l'astrophysique, le décalage vers le rouge : lorsqu'un astre s'éloigne de l'observateur, sa lumière rougit, c'est-à-dire que son spectre lumineux est décalé vers les grandes longueurs d'onde en direction du rouge *(voir l'infographie p. 12)*. Au contraire, s'il s'en approche, elle bleuit. Vesto Slipher constate ce phénomène pour 41 galaxies, dont 36 semblent s'éloigner de nous et 5 se rapprocher. *« Mais il ne le publie pas !* précise Jean-Pierre Luminet, du Laboratoire d'astrophysique de Marseille. *C'est Eddington qui – heureusement ! – mentionnera les observations de Slipher dans ses écrits, les présentant au passage comme le problème le plus embarrassant de la cosmologie. »* Slipher poursuit ses observations jusqu'à déterminer la distance de 46 galaxies et, pour chacune d'entre elles, le décalage vers le rouge. Ses mesures confirment une relation inattendue : plus les galaxies sont éloignées, plus ce décalage est important. Autrement dit, plus elles donnent l'impression de s'éloigner rapidement. Ainsi le décalage vers le rouge s'avère-t-il proportionnel à la distance. Mais, on le comprendra quelques années plus tard, derrière cette régularité se cache bien autre chose qu'un mouvement coordonné des galaxies. Tout se passe comme si l'espace entier était en expansion, emportant chacune d'elles dans sa course. Pour expliquer ce phénomène, une image est souvent utilisée : un ballon de baudruche constellé de points et que l'on gonfle, faisant s'éloigner les points les uns des autres. En réalité, leur position ne ●●●



Surface hyperbolique *(selle de cheval)*



Surface euclidienne *(plate)*



Surface sphérique

MEHDI BENYEZZAR

●●● varie pas; c'est le ballon qui grossit. De la même manière, ce ne sont pas les galaxies qui se meuvent, mais l'espace qui se dilate. Le fameux rougissement observé dans leur spectre provient non pas de leur déplacement, mais de l'expansion de l'espace, qui dilate les fréquences, ce qui revient à les décaler vers le rouge : ce qu'on appelle le décalage vers le rouge cosmologique.

Cette loi qui relie la vitesse d'éloignement des galaxies à leur distance *« est le résultat le plus important de la cosmologie,* précise Jean-Pierre Luminet. *Il indique que l'Univers a une histoire. Nous le connaissons sous le nom de loi de Hubble, qui lui sera donné en 1929, mais il faut rendre justice à ses véritables artisans ».* En effet, en 1927 déjà, Georges Lemaître publiait en français, dans les *Annales de la société scientifique de Bruxelles*, un texte mentionnant *« un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques [c'est ainsi que l'on appelait alors les galaxies, ndlr] ».* « De rayon croissant » : cette expression désigne bien l'expansion, et le texte interprète pour la première fois le décalage vers le rouge des galaxies comme prouvant la dilatation de l'Univers.

Écrit dans la langue de Molière, cet article n'a toutefois que peu d'impact. En 1929, Hubble utilise principalement les observations de Vesto Slipher pour établir un diagramme montrant que la vitesse de fuite des galaxies est proportionnelle à leur distance. *« Mais, au contraire de Lemaître, il n'y voit pas l'effet de l'expansion,* souligne Jean-Pierre Luminet. *Pour lui, ce sont les galaxies qui fuient, et non l'espace qui gonfle. C'est donc à tort que Hubble est généralement présenté comme le père du Big Bang. »* Quelques années plus tard, en effet, l'expansion de l'espace deviendra l'argument fondamental de la théorie affirmant que l'Univers était très dense et très chaud à ses tout débuts, hypothèse qui prendra le nom de Big Bang.

Hyperbolique, plat ou sphérique ?
Les propriétés géométriques de l'Univers dépendent de sa courbure, déterminée par la quantité de matière et d'énergie qu'il contient. Dans un espace plat, hypothèse privilégiée aujourd'hui, la somme des angles d'un triangle fait 180 degrés. Elle est inférieure sur une hyperbole, supérieure sur une sphère.

Mais l'affaire ne s'arrête pas là. Traduit en 1931, l'article de Lemaître est publié en anglais dans les notices mensuelles de la Société royale d'astronomie. Sauf que la traduction est amputée ! Manque précisément le paragraphe sur l'expansion. Les historiens des sciences sont allés jusqu'à soupçonner Hubble d'avoir usé de son influence pour faire supprimer une partie du texte et s'octroyer ainsi la primeur de ce travail. En 2011, l'astronome israélien Mario Livio, se basant sur une lettre manuscrite de l'abbé en personne, a tranché : c'est bien Lemaître qui a retiré le passage ! Sans doute faut-il chercher les raisons de cette décision, pour nous incompréhensible, dans la personnalité même du chanoine, celle d'un homme fuyant la compétition entre scientifiques, et qui a jugé inutile de présenter un travail similaire à celui de Hubble, malgré son antériorité. Et pourtant, Lemaître marquera l'histoire. D'autant que, dans un second article, il développe cette même année la théorie de l'atome primitif, prémices de ce qui deviendra le modèle du Big Bang. Selon le chanoine, puisque l'Univers est en expansion continue, il a dû autrefois être extrêmement dense et chaud. Il suffit de dérouler le film de cette expansion à l'envers pour remonter jusqu'à l'état nommé « atome primitif ». *« Les réactions à cette théorie ont été très hostiles,* raconte Jean-Pierre Luminet. *"Cela rappelle trop le dogme de la création", disait Einstein, tandis qu'Eddington déclarait : "La notion de commencement du monde me répugne". Lemaître,*

FRANÇOISE COMBES* MON ŒUVRE D'ART PRÉFÉRÉE

« L'astronomie nous apporte des images incroyables, des explosions de supernovæ qui développent des volutes et des bulles, photographiées avec un infini détail par les télescopes au sol ou dans l'espace. Lorsque toutes les longueurs d'onde sont réunies, le spectacle ressemble à un ballet, où les molécules tournoient dans un sens, les particules énergétiques fusent dans l'autre, comme des jets très minces. Les galaxies en interaction forment des bras de marée et des anneaux, dont un peintre comme van Gogh, qui a si bien représenté la *Nuit étoilée*, aurait pu s'emparer pour faire une œuvre inoubliable. »

Professeur au Collège de France

E. LESSING/AKG-IMAGES

NASA/ESA/HUBBLE

pourtant, plaçait la théorie cosmologique en dehors de toute question métaphysique ou religieuse. » Pour la petite histoire, le terme même de Big Bang deviendra célèbre grâce à un opposant à cette même théorie, l'astrophysicien Fred Hoyle *(lire p. 20-22)*, qui l'a ainsi baptisée par dérision.

Un astre très pâle est-il très éloigné de nous ou simplement peu lumineux ?

Le fameux diagramme de Hubble prend un sens nouveau une fois admis que l'Univers a une histoire : il reflète le taux d'expansion de ce dernier. L'allure à laquelle l'espace se dilate. Sa valeur d'aujourd'hui, nommée H0, permet d'évaluer le temps qui s'est écoulé depuis le Big Bang, c'est-à-dire l'âge de l'Univers.

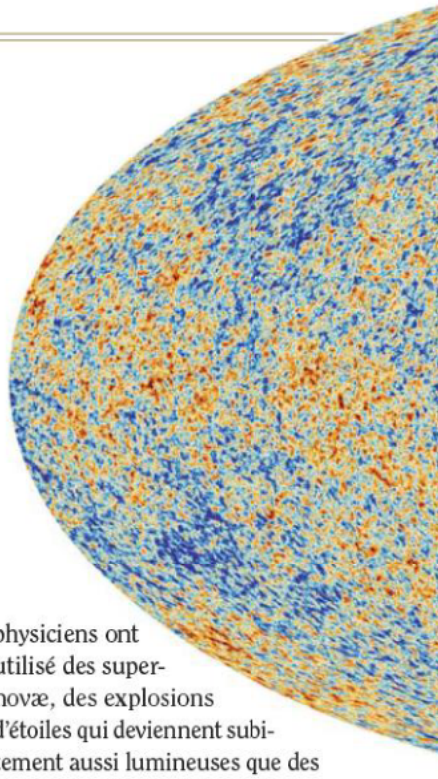
La détermination de cette valeur nécessite de connaître la distance des astres lointains, ce qui n'est guère aisé : un astre qui paraît très pâle est-il très éloigné de nous ou intrinsèquement peu lumineux? Lemaître, comme Hubble, formulent une hypothèse *« qui nous semble grossière aujourd'hui, mais pas si déraisonnable »*, note Jean-Pierre Luminet : les nébuleuses extragalactiques sont si éloignées de nous qu'elles doivent toutes avoir la même luminosité propre. Ainsi leur éclat visible traduit leur distance. C'est grâce à cette hypothèse simple que Lemaître, en 1927, et Hubble, deux ans plus tard, calculent que le taux d'expansion de l'Univers est de 575 km/s/Mpc pour l'un et 530 km/s/Mpc pour l'autre. Ce qui signifie que deux astres distants d'un mégaparsec (Mpc), soit 3,2 millions d'années-lumière, s'écartent chaque seconde d'environ 550 kilomètres. Une valeur vertigineuse, qui suppose que l'espace a gonflé très vite. Les calculs indiquent alors que… deux milliards d'années seulement se sont écoulés depuis le Big Bang! Une erreur due à une mauvaise détermination de la distance des céphéides, ces étoiles variables qui servent de repères dans le ciel.

Par la suite, la valeur de H0 ne cessera d'être revue. Au milieu des années 1990, les estimations convergeaient autour de 70 et l'Univers affichait environ 14 milliards d'années. C'est ce que retiennent encore les cosmologistes aujourd'hui, alors que la situation a changé en 1998 avec la découverte, rendue possible par les nouveaux instruments, de l'expansion accélérée de l'espace. Les astrophysiciens ont alors été contraints de formuler l'hypothèse d'une étrange énergie noire accélérant l'expansion… Un véritable pavé dans la mare cosmologique. ■

Les fluctuations de l'éclat des céphéides, des étoiles dites variables, permettent de déterminer leur luminosité réelle et donc leur distance. Ci-dessus, RS Puppis, une céphéide distante de 6000 années-lumière de la Terre dans la direction de la constellation de la Poupe, vue par le télescope spatial Hubble.

Crise dans la cosmologie ! Alors qu'elle pensait avoir reconstitué l'histoire de l'Univers, elle se trouve aujourd'hui défiée par un problème fondamental : l'accélération de la dilatation de l'espace.

La brûlante question de l'expansion



Rien ne va plus chez les cosmologistes ! Au cœur du problème : le taux d'expansion de l'Univers. Sa valeur actuelle, connue sous le nom de H0 – ou constante de Hubble –, est à la base de notre compréhension de l'histoire du Cosmos, dont elle permet rien de moins que de déduire l'âge *(lire p. 10-15)*. Or, selon la manière dont elle est estimée, cette constante prend des valeurs irréconciliables entre elles !

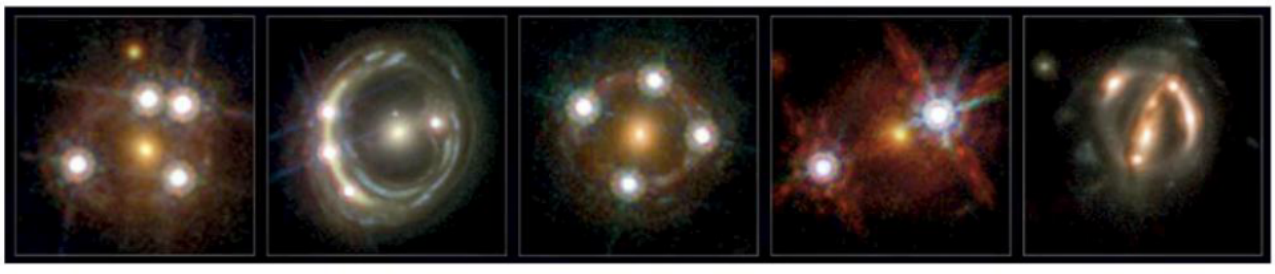
Il faut dire que depuis deux décennies, les astrophysiciens doivent composer avec une entité mystérieuse, l'énergie noire, responsable de la dilatation de plus en plus rapide de l'espace. Autrement dit, de l'accélération de l'expansion de l'Univers. Les hypothèses formulées à son sujet se sont révélées jusqu'à ce jour imparfaites et les expériences programmées pour cerner sa nature, infructueuses. Or, elle affecte les distances et modifie, de ce fait, le taux d'expansion de l'Univers, ouvrant une brèche inattendue dans notre compréhension du Cosmos…

Jusque-là, celle-ci était simple. L'Univers voyait s'affronter d'une part, l'expansion, qui dilatait l'espace à un rythme imperturbable, d'autre part, la force de gravité exercée par la matière, qui s'y opposait. En toute logique, l'expansion de l'Univers devait donc progressivement ralentir, freinée par la gravité.

Un modèle pulvérisé en 1998.

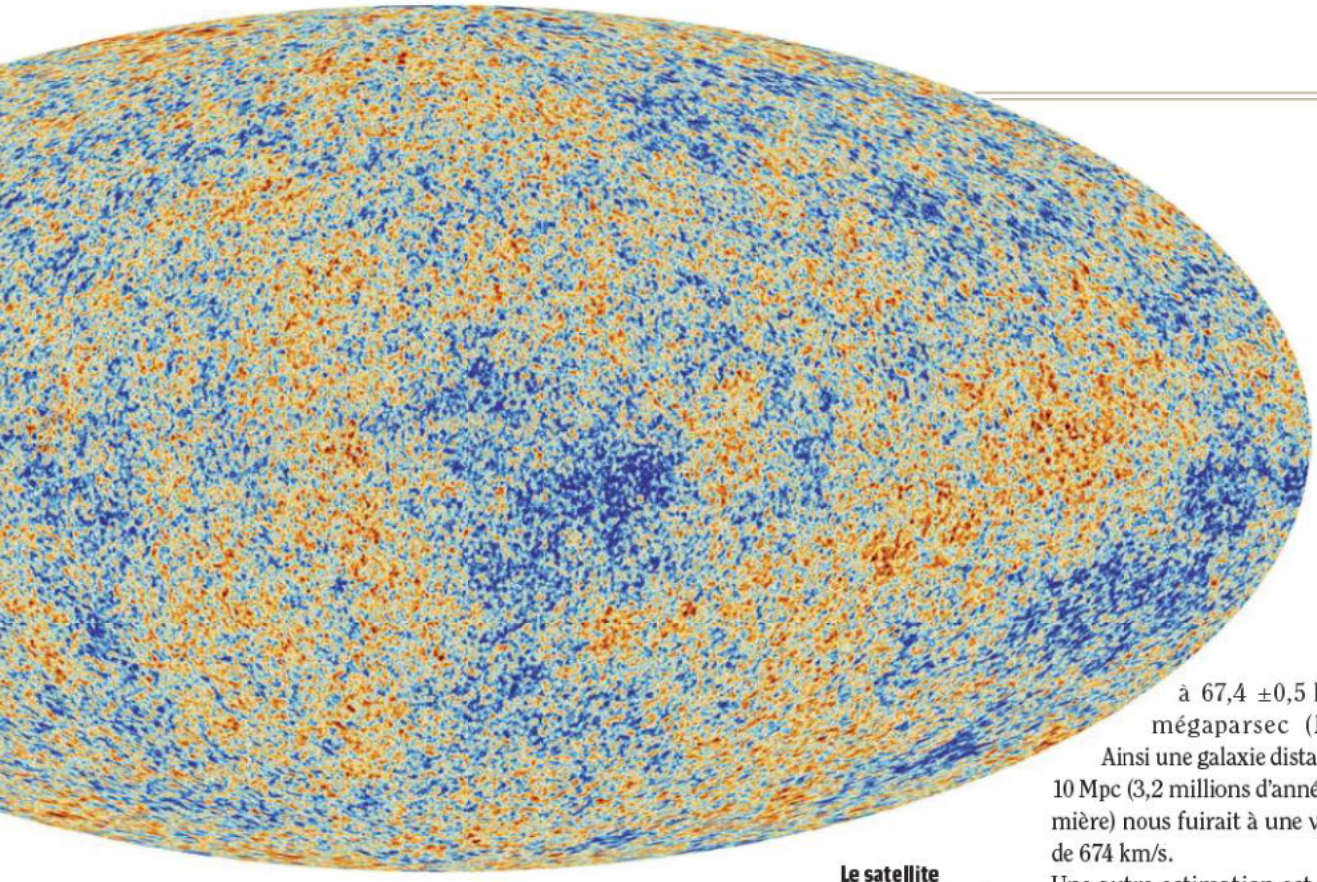
Cette année-là, deux équipes internationales, l'une menée par Saul Perlmutter au Laboratoire national Lawrence-Berkeley (Californie), l'autre par Adam Riess, à l'époque à l'université de Berkeley, et Brian Schmidt à l'observatoire de Siding Spring, en Australie, ont mis en évidence un effet surprenant – qui leur vaudra le prix Nobel de physique de 2011. Dans leurs campagnes d'observation destinées à évaluer les distances cosmologiques, ces physiciens ont utilisé des supernovæ, des explosions d'étoiles qui deviennent subitement aussi lumineuses que des milliards de soleils, ce qui permet de les suivre facilement. Certaines d'entre elles partagent en outre une caractéristique intéressante : elles explosent toujours dans les mêmes conditions, indépendamment de leur âge, taille et localisation. De ce fait, elles émettent la même quantité de lumière où qu'elles soient. Résultat : leur luminosité apparente ne traduit que leur éloignement. Elles peuvent ainsi servir de repères pour indiquer les distances… d'où leur nom de « chandelles standard ».

Or, à l'issue de leur traque, les deux équipes ont abouti au même constat : les supernovæ distantes apparaissaient environ 25 % moins lumineuses qu'attendu. Hypothèse la plus probable : elles étaient donc en réalité plus éloignées ! Sous l'ef-



ESA/HUBBLE, NASA, SUYU ET AL.

Cinq quasars – galaxies très énergétiques – lointains dont l'image est démultipliée à cause de la présence d'une masse importante, comme celle d'un amas de galaxies se situant sur la ligne de visée. Lorsque le quasar émet un flash, celui-ci est visible sur les images mirages avec un retard sur chaque image. Ce retard peut être exploité pour déterminer la dilatation de l'espace pendant que se propage la lumière.



ESA AND THE PLANCK COLLABORATION

Le satellite européen Planck a étudié la première lumière de l'Univers et ses infimes contrastes de température, qui traduisent les minuscules germes de futures galaxies. À partir d'un modèle cosmologique, il permet d'estimer le taux d'expansion de l'Univers.

fet d'une force inconnue qui accélère l'expansion de l'Univers, interprètèrent les chercheurs. L'énergie noire – ou *dark energy* – venait de faire une intrusion fracassante en cosmologie.

Des contrastes de l'ordre du cent millionième de degré

Et obligeait à bâtir un nouveau modèle intégrant son existence, mais aussi la fameuse matière noire dont l'hypothèse avait été formulée dans les années 1970. Une masse invisible indispensable pour expliquer la vitesse de rotation des astres aussi bien au sein de notre galaxie qu'au cœur des très grandes structures de l'Univers. Désormais, les ingrédients en présence se répartissaient donc ainsi : 30 % de matière (visible ou invisible) agissant par une force gravitationnelle attractive pour 70 % d'énergie noire dont l'action, à l'inverse, dilatait l'espace.

C'est armés d'un tel modèle qu'au tournant des années 2000, des satellites, comme WMap de la Nasa puis Planck de l'Esa, ont été mis en orbite afin d'observer le fond diffus cosmologique, la première lumière de l'Univers, émise lorsqu'il avait 380 000 ans *(lire aussi p. 64-69)*. Baignant l'espace tout entier, il comporte d'infimes contrastes de température de l'ordre du cent millionième de degré, qui correspondent à des régions de densité légèrement différente ; les plus denses étant les germes de futures galaxies. *« Ils reflètent les conditions qui régnaient dans l'Univers lorsqu'il était âgé de 380 000 ans. Et permettent d'en déduire, dans le cadre du modèle cosmologique, le taux d'expansion que nous devrions observer aujourd'hui »*, explique Karim Benabed, de l'Institut d'astrophysique de Paris. Le satellite Planck a balayé le ciel avant de livrer ses conclusions : selon lui, H0 est égal à 67,4 ±0,5 km/s/mégaparsec (Mpc). Ainsi une galaxie distante de 10 Mpc (3,2 millions d'années-lumière) nous fuirait à une vitesse de 674 km/s.

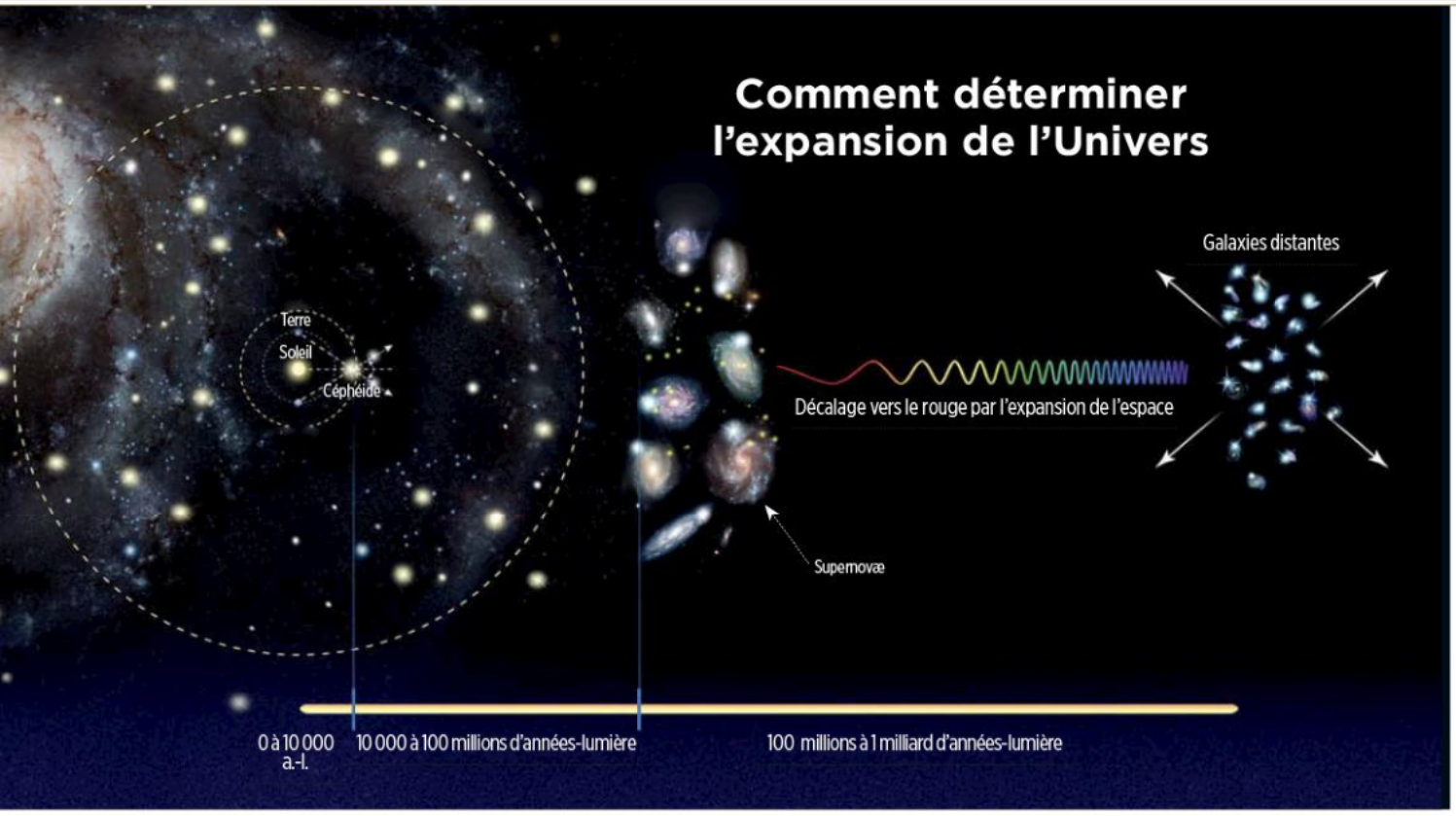
KARIM BENABED

« Ces infimes contrastes reflètent les conditions qui régnaient dans l'Univers âgé de 380 000 ans »

Karim Benabed, Institut d'astrophysique de Paris, membre de l'équipe Planck

Une autre estimation est basée sur l'observation des galaxies aux grandes échelles. Selon le modèle cosmologique actuel, leur distribution provient du grossissement, proportionnellement au taux d'expansion de l'Univers, d'une distance caractéristique repérée dans la carte du fond diffus cosmologique. *« Cette méthode indique aussi une valeur de H0 égale à 67,4 ±1 »*, précise Karim Benabed. Un accord parfait… jusqu'à ce que survienne le fatal rebondissement.

Car pour déduire H0, il existe une autre stratégie que d'étudier le fond diffus : la détermination directe grâce aux observations. Une méthode simplissime en théorie : il suffit de mesurer d'une part à quelle vitesse une galaxie s'éloigne de nous, de l'autre sa distance, comme l'avaient fait, en leur temps, Vesto Slipher, Edwin Hubble et Georges Lemaître. La première étape ne pose pas de problème, grâce au décalage vers le rouge du spectre des galaxies *(voir l'infographie p. 18)*. Plus difficile est de mesurer directement la distance de l'astre. Depuis quelques ●●●



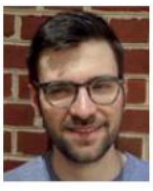
NASA, ESA, A. FIELD AND A. RIESS

●●● années, une équipe menée par Adam Riess a utilisé le télescope spatial Hubble pour observer les céphéides. Les variations d'éclat de ces étoiles permettent de déduire leur luminosité réelle et donc leur distance. Sur l'échelle mesurant les distances dans l'Univers, les céphéides font office de premier barreau, les supernovæ menant plus loin… *« Leurs mesures indiquent un taux d'expansion de 74,3 ±1,42 km/s/Mpc,* indique Vivian Poulin-Détolle, de l'université de Montpellier. *Dans un premier temps, les incertitudes qui pesaient sur ces valeurs étaient telles qu'il était possible d'envisager de les concilier. Mais chaque équipe a amélioré la qualité de ses données pour diminuer ces barres d'erreur… et le désaccord persiste. »*

D'où la nécessité de chercher d'autres astuces de mesure. À l'École polytechnique fédérale de Lausanne, Frédéric Courbin et ses collègues du programme Holicow traquent, grâce au télescope spatial Hubble, des quasars lointains, trous noirs supermassifs cernés de matière tiraillée et chauffée en passe d'être engloutie, qui les rend très lumineux. De temps en temps, une étoile plonge dans le trou noir, et c'est un flash de lumière que surprennent les astrophysiciens. Or, lorsqu'une masse importante – un amas de galaxies, par exemple – se trouve sur la ligne de visée entre l'observateur et le quasar, l'image de ce dernier apparaît démultipliée. La masse se comporte comme une lentille gravitationnelle et dévie la lumière du quasar, à la manière d'une lentille optique déformant l'image de l'objet observé *(voir l'infographie p. 68)*. Un effet prédit par Einstein : la masse courbe l'espace et démultiplie l'image d'un astre lointain, formant autant de mirages. *« Nous avons étudié six de ces quasars,* explique Frédéric Courbin. *Lorsque l'astre émet un flash de lumière, celui-ci est visible sur les images mirages avec un léger retard les unes par rapport aux autres. Ce retard dépend du trajet emprunté par la lumière pour former l'image. Or, au cours de ce trajet, l'Univers se dilate. »* C'est en mesurant ce retard que l'équipe Holicow parvient à estimer le taux d'expansion de l'Univers : 73,3±1,7km/s/Mpc, une valeur plutôt conforme à celle déduite des céphéides.

Ainsi, le doute pèse sur le taux d'expansion de l'espace. Et donc sur notre vision de l'histoire de l'Univers… *« Cette situation justifie que l'on se penche davantage sur le modèle cosmologique »*, recon-

Pour estimer le taux d'expansion de l'Univers, il faut déterminer d'une part à quelle vitesse les galaxies nous fuient, d'autre part à quelle distance elles se situent. En réalité, les galaxies ne se déplacent pas, mais elles semblent nous fuir à cause de l'expansion de l'espace, qui décale leur lumière vers le rouge. La détermination des distances s'appuie sur des astres « indicateurs », comme des céphéides au sein de la Voie lactée ou encore des supernovæ au cœur de galaxies lointaines.



COURTESY V. POULIN

« Un événement que nous ignorons encore a dû affecter la première lumière de l'Univers »

Vivian Poulin-Détolle, cosmologiste à l'université de Montpellier

naît Karim Benabed. Quelques pistes de recherche sont d'ores et déjà privilégiées : *« Un événement que nous ignorons encore a dû affecter la première lumière de l'Univers,* estime Vivian Poulin-Détolle. *Par exemple, nous pouvons envisager qu'il y a davantage d'énergie au sein de l'Univers primordial que ce que suppose le modèle cosmologique. Autre hypothèse : l'existence d'un nouveau type de neutrino. »* Ces particules très abondantes dans l'Univers sont de trois sortes selon le modèle cosmologique standard. L'existence d'une quatrième variété, appelée neutrino stérile, est encore hypothétique. L'envisager comme ingrédient des premiers instants pourrait expliquer en partie le désaccord actuel. *« Il n'est pas non plus à exclure que l'énergie noire ait joué un rôle essentiel à cette époque »,* estime le chercheur.

Dénicher enfin la trace de la phase d'inflation

Pour tester leurs hypothèses, les spécialistes comptent sur des moyens terrestres et spatiaux : afin d'étudier l'énergie noire, le télescope spatial Euclid de l'Esa sera lancé en 2022. Le satellite japonais Lite Bird, mis en orbite en 2020, ira quant à lui fouiller de nouveau la première lumière pour y dénicher en particulier la trace de la phase d'inflation. Enfin, dans le désert d'Atacama, au Chili, devrait voir le jour l'année prochaine l'observatoire Simons pour l'étude du fond diffus. Vu l'impatience de la communauté, *« il est très probable que le problème sera résolu d'ici quatre à cinq ans »,* espère Vivian Poulin-Détolle. Peut-être débouchera-t-il sur un nouveau modèle cosmologique… et son lot de mystères. ■ **AZAR KHALATBARI**

66 interview

FRANÇOISE COMBES

Professeur au Collège de France, chaire Galaxies et cosmologie

« Le modèle cosmologique en vigueur doit être remis en cause »

J. FAURE / LEEMAGE

Que pensez-vous des différentes méthodes d'estimation du taux d'expansion de l'Univers ?

Elles reposent toutes sur des principes très différents. C'est une grande richesse de pouvoir cerner le même paramètre à partir de méthodes aussi variées, et nous devons continuer à en chercher d'autres. Cependant, certaines sont moins précises. Non parce que les mesures n'ont pas été effectuées correctement, mais pour des raisons intrinsèques au modèle : par exemple, en ce qui concerne l'utilisation des lentilles gravitationnelles, nous ignorons tout de l'étendue et de la forme de la masse qui constitue la lentille : s'agit-il d'un ensemble de petites galaxies ? De matière noire ? Cela se traduit par des incertitudes importantes. Par ailleurs, seules une poignée d'images « lentillées » (subissant l'effet de lentilles gravitationnelles) ont été étudiées. Quant à la valeur déduite des données obtenues par le satellite Planck, elle provient de l'observation du ciel tout entier, mais dépend du modèle cosmologique aujourd'hui en vigueur. L'utilisation des céphéides constitue la méthode la plus directe. L'éclat de ces étoiles varie, ce qui permet d'en déduire la distance grâce à une relation établie au tout début du xx[e] siècle par l'astronome américaine Henrietta Lewitt. D'autres indicateurs de distance viennent les renforcer, comme les masers, des équivalents du laser mais dans les fréquences des micro-ondes, que l'on observe près des trous noirs centraux de certaines galaxies.

Y a-t-il encore un espoir d'affiner les mesures dans le but de les concilier ?

Je ne le pense pas. Les différentes équipes ont remarquablement bien revu leurs analyses, diminuant ainsi leurs incertitudes. Il apparaît désormais que la valeur du taux d'expansion de l'Univers déduite des céphéides est incompatible avec celui fourni par la mission Planck. Or, dans ce cas, nous devons privilégier les observations directes, non les déductions reposant sur des modèles. Ce désaccord implique que le modèle cosmologique en vigueur doit être remis en cause.

Dans quel sens ?

Une hypothèse est de supposer l'existence de particules supplémentaires dans la prime enfance de l'Univers. Par exemple, certains pensent à une quatrième famille de neutrinos : libérées à l'issue de la phase primordiale très dense et très chaude de l'Univers, où matière et lumière étaient intimement mélangées, ces particules supplémentaires auraient pu communiquer leur énergie au fond diffus cosmologique que mesure Planck. Cette énergie pourrait expliquer un taux d'expansion légèrement plus élevé. Mais d'autres équipes imaginent de nouveaux ingrédients, des axions par exemple, particules hypothétiques qui pourraient être des candidats pour la matière noire. Tout cela indique que nous avons encore beaucoup à faire pour comprendre l'Univers. Le modèle cosmologique en sortira-t-il légèrement modifié ou totalement bouleversé ? Nous ne le savons pas encore.

Les trublions de la cosmologie

Ils ont remis en question les théories les mieux établies avec ténacité, audace... et parfois mauvaise foi. Mais leurs erreurs mêmes ont stimulé le débat scientifique.

GALILÉE
(1564-1642)

L'empêcheur de tourner en rond

« *Et pourtant, elle tourne* », aurait dit Galilée en 1633, selon une légende sans réel fondement. L'astronome italien venait, à l'issue de son procès en hérésie, d'abjurer malgré lui une vérité bien trop choquante pour la Chrétienté : la Terre tourne autour du Soleil. Grâce à sa lunette astronomique – une invention récente qu'il a lui-même perfectionnée –, il a en effet pu percer les mystères d'un Système solaire jusqu'alors inaccessible. Après avoir découvert les cratères et les montagnes de la Lune, il observe en 1610 les satellites de Jupiter... et démontre ainsi que tout ne tourne pas autour de la Terre. Un résultat en contradiction avec la théorie « géocentrique » de Ptolémée, admise depuis plus de 1500 ans et déjà remise en question, au plan théorique, par Nicolas Copernic et Johannes Kepler. Galilée lui porte le coup de grâce dans un ouvrage audacieux, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, où il met en scène trois personnages qui débattent des modèles de Ptolémée – qu'il tourne en dérision – et de Copernic. C'en est trop pour l'Église... L'histoire donnera pourtant raison au Toscan.

ALBERT EINSTEIN
(1879-1955)

Le révolutionnaire

$E = mc^2$... Cette célébrissime formule est systématiquement associée au personnage d'Albert Einstein. Pourtant, elle n'est qu'une partie de sa théorie, l'une des plus brillantes de l'histoire des sciences. En 1905, le physicien suisse bouleverse l'idée que nous nous faisons de l'espace et du temps. Il comprend que puisque dans le vide, la vitesse de la lumière est constante et indépassable, l'espace et le temps ne sont plus absolus à l'approche de cette vitesse : ils dépendent du repère considéré. C'est la « relativité restreinte ». Restreinte, car limitée aux objets dont le mouvement est uniforme. Mais Einstein ira beaucoup plus loin. En 1915, il publie son grand œuvre, la relativité générale, où il montre que les champs gravitationnels sont en fait la conséquence de la géométrie de l'espace-temps. Plus un corps est massif, plus il déforme celui-ci autour de lui.

Mais même un esprit aussi audacieux a ses limites. Comme il croit à un Univers statique et que les équations de la relativité générale indiquent que celui-ci est en expansion, Einstein leur rajoute un paramètre, la « constante cosmologique »... qu'il devra se résoudre

à abandonner à la suite des travaux de Friedmann, Lemaître et Hubble dans les années 1920 (*lire p. 10-19*).

FRED HOYLE
(1915-2001)

L'agitateur d'idées

Le Big Bang est né un samedi soir de 1950 sur les ondes de la BBC, dans la bouche du Britannique Fred Hoyle. Le bouillant cosmologiste ne goûtait guère la théorie de la formation de l'Univers élaborée à la fin des années 1920, et qui impliquait un « atome primitif » se désintégrant en une gigantesque explosion. Il la rebaptise, par dérision, « Grand Boum ». En termes de marketing, on ne pouvait rêver mieux…

Tout commence dans les années 1920, lorsque Edwin Hubble observe que les galaxies s'éloignent de nous à une vitesse proportionnelle à leur distance. Pour l'astronome américain, cela tend à confirmer l'expansion de l'Univers à partir d'un « moment zéro » où sa densité et sa température sont quasi infinies. Mais Hoyle, ainsi que ses collègues autrichiens Thomas Gold et Hermann Bondi, n'y croient pas – c'est *« irrationnel »*, selon Hoyle. Ils échafaudent une théorie alambiquée, celle d'un Univers « stationnaire », en expansion mais sans commencement. Pour compenser le fait que sa densité diminue à mesure qu'il enfle, ils imaginent que de la matière se crée en permanence dans les espaces intergalactiques… En 1965, la découverte du fond diffus cosmologique, témoignage fossile du Big Bang, sonne le glas de leur théorie. Qu'importe : Fred Hoyle, auteur par ailleurs d'avancées majeures sur la compréhension de la synthèse d'éléments chimiques dans les étoiles, agitateur bourré d'idées – il pense que la vie sur Terre est venue directement de l'espace –, ne changera pas d'avis.

Simon Singh, *Le Roman du Big Bang*, JC Lattès, 2005

Alain Bouquet, Emmanuel Monnier, *Matière sombre et énergie noire*, Dunod, 2008

Yaël Nazé, *L'Astronomie au féminin*, CNRS éditions, 2014

Gabriel Chardin, *L'Insoutenable Gravité de l'Univers*, Le Pommier, 2018

MORDEHAI MILGROM
(1948 -)

L'iconoclaste

Depuis des décennies, les astrophysiciens tentent de capturer, dans d'immenses détecteurs ou des accélérateurs de particules, la matière noire, qui constituerait plus du quart de l'Univers. En vain. Et si elle n'existait tout simplement pas ? C'est la thèse du physicien Mordehai Milgrom. En 1983, ce chercheur israélien publie sa théorie alternative : Mond (Modified Newtonian Dynamics). Une hypothèse pour le moins iconoclaste : elle postule que la deuxième loi de Newton – le « principe fondamental de la dynamique » qui régit le mouvement des corps – et les ●●●

LA COLLECTION - LEEMAGE/BRIDGEMAN - SPL - WEIZMANN INSTITUTE OF SCIENCE - AKG IMAGES - SPL - CYRIL LENTZMANN/DIVERGENCE

AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS / SPL

Vera Rubin mesurant le spectre d'une étoile. Par ses calculs, la chercheuse a démontré l'existence de la matière noire.

●●● lois de la relativité générale d'Einstein ne s'appliquent pas de la même manière partout. Il suffit donc de les modifier localement, sans avoir recours à la matière noire. L'hypothèse Mond est reçue froidement par la communauté scientifique. Mais depuis, d'autres théoriciens ont raffiné le modèle, voire élaboré une conception radicalement nouvelle de la gravité, comme le physicien Erik Verlinde, de l'université d'Amsterdam. Pour lui, ce n'est pas une force permanente, mais un phénomène émergent, lié à l'entropie (le désordre) du milieu. Aujourd'hui, Mond est un terreau fertile pour les controverses scientifiques.

FRITZ ZWICKY
(1898-1974)

VERA RUBIN
(1928-2016)

Les rebelles

En 1933, l'astronome suisse Fritz Zwicky observe sept galaxies d'un amas situé dans la constellation de la Chevelure de Bérénice. Il constate que les plus éloignées du centre tournent autour de celui-ci beaucoup plus vite que ne le prévoient les lois du mouvement des corps célestes. Au point qu'elles devraient être éjectées de l'amas. Il existe donc une masse cachée non lumineuse qui les retient. Cette hypothèse très audacieuse est totalement ignorée par la communauté scientifique. L'échantillon de galaxies est réduit, les estimations de la masse de l'amas hasardeuses… Surtout, l'excentrique Zwicky critique ouvertement la théorie du Big Bang et n'hésite pas à traiter ses collègues d'*« imbéciles sphériques »* – parce qu'il les juge idiots à tous les points de vue. La mystérieuse masse cachée, plus tard rebaptisée « matière noire », retombe donc dans l'oubli.

Jusqu'à ce qu'une jeune astronome américaine, Vera Rubin, remarque à la fin des années 1960 que les vitesses d'étoiles de la galaxie d'Andromède ne diminuent pas à mesure que les astres s'éloignent du centre de la galaxie. Elle imagine alors *« un mécanisme qui accélère les étoiles qui vont trop lentement, ou qui les ralentit quand elles vont trop vite »*. La matière noire s'installe désormais au cœur du débat scientifique… Au prix, toutefois, de combats acharnés pour Vera Rubin. Car les sciences sont alors peu ouvertes aux femmes. Une anecdote en dit long : à l'observatoire du Mont-Palomar (Californie), alors le plus puissant au monde, il n'existe de toilettes que pour les hommes. Qu'à cela ne tienne : elle dessine sur la porte une silhouette féminine en jupe… Juste récompense de ses travaux, Vera Rubin sera nommée à l'Académie américaine des sciences en 1981.

GABRIEL CHARDIN
(1955-)

L'audacieux

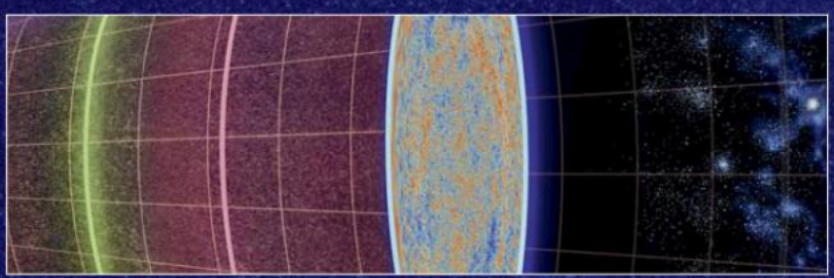
« Masse négative », « antigravité »… Le modèle d'Univers proposé par le physicien français Gabriel Chardin semble tout droit sorti d'un film de science-fiction. Il vise pourtant à résoudre les nombreux problèmes posés par le modèle cosmologique actuel. En résumé : 70 % d'une énergie noire responsable de l'expansion accélérée de l'Univers, 25 % de matière noire, qui expliquerait la vitesse élevée de rotation des étoiles dans les galaxies… et 5 % de matière « ordinaire », celle dont nous sommes faits. Problème : on ignore la nature des deux premières. En outre, il est toujours impossible de concilier ce modèle avec la physique quantique, qui décrit les phénomènes à l'échelle des atomes. Alors, Gabriel Chardin convoque l'antimatière. Lorsqu'une particule de matière rencontre une particule d'antimatière, elles s'annihilent en produisant un photon. Alors qu'au commencement de l'Univers, il y avait autant de matière que d'antimatière, cette dernière a mystérieusement disparu. Où est-elle passée ? Elle s'est répartie entre les galaxies, selon le physicien. Une antimatière bien étrange : elle a une masse négative et elle antigravite, c'est-à-dire qu'elle tombe… vers le haut ! Plusieurs expériences tenteront prochainement de vérifier ces prédictions. ■

JEAN-FRANÇOIS HAÏT

CAHIER REPÈRES

ILLUSTRATIONS : PIERRE CARRIL POUR *SCIENCES ET AVENIR*

Où sommes-nous dans l'Univers ? p. 24



Quel est l'âge de l'Univers ? p. 26

Qu'y a-t-il dans l'Univers ? p. 28

À très grande échelle, la matière visible dans l'Univers s'ordonne en un ré de filaments, à l'image d'une é Les amas et superamas de gala trouvent aux jonctions entre les f Cette structure n'est pas direc visible par nos moyens d'obser mais des simulations numéri permettent d'en faire le port La matière est répartie d manière inhomogène dan l'Univers.

Laniakea, « le ciel immense et incommensurable » en hawaiien : tel est le nom de notre superamas. Ces structures regroupent chacune une dizaine d'amas. Le nôtre forme une bulle de 500 millions d'années-lumière qui contient au moins cent millions de milliards de soleils. À cause de l'expansion de l'Univers, les superamas se défont progressivement, les astres n'étant pas suffisamment rapprochés pour que leur attraction gravitationnelle les maintienne ensemble.

Le Groupe local dont fait partie la Voie lactée est un ensemble d'une cinquantaine de galaxies en interaction gravitationnelle les unes avec les autres. En dehors de la nôtre, les plus importantes sont Andromède, la galaxie spirale du Triangle et les deux Nuages de Magellan. Ce petit amas a une dimension d'environ six millions d'années-lumière. Il fait partie, avec un millier de galaxies, de l'amas de la Vierge.

La Voie
200 mi
comme
d'envir
étend s
gaz à tr
galaxie
Elle est
noir su
en bord
26 000

OÙ SOMMES-NOUS DANS L'UNIVERS ?

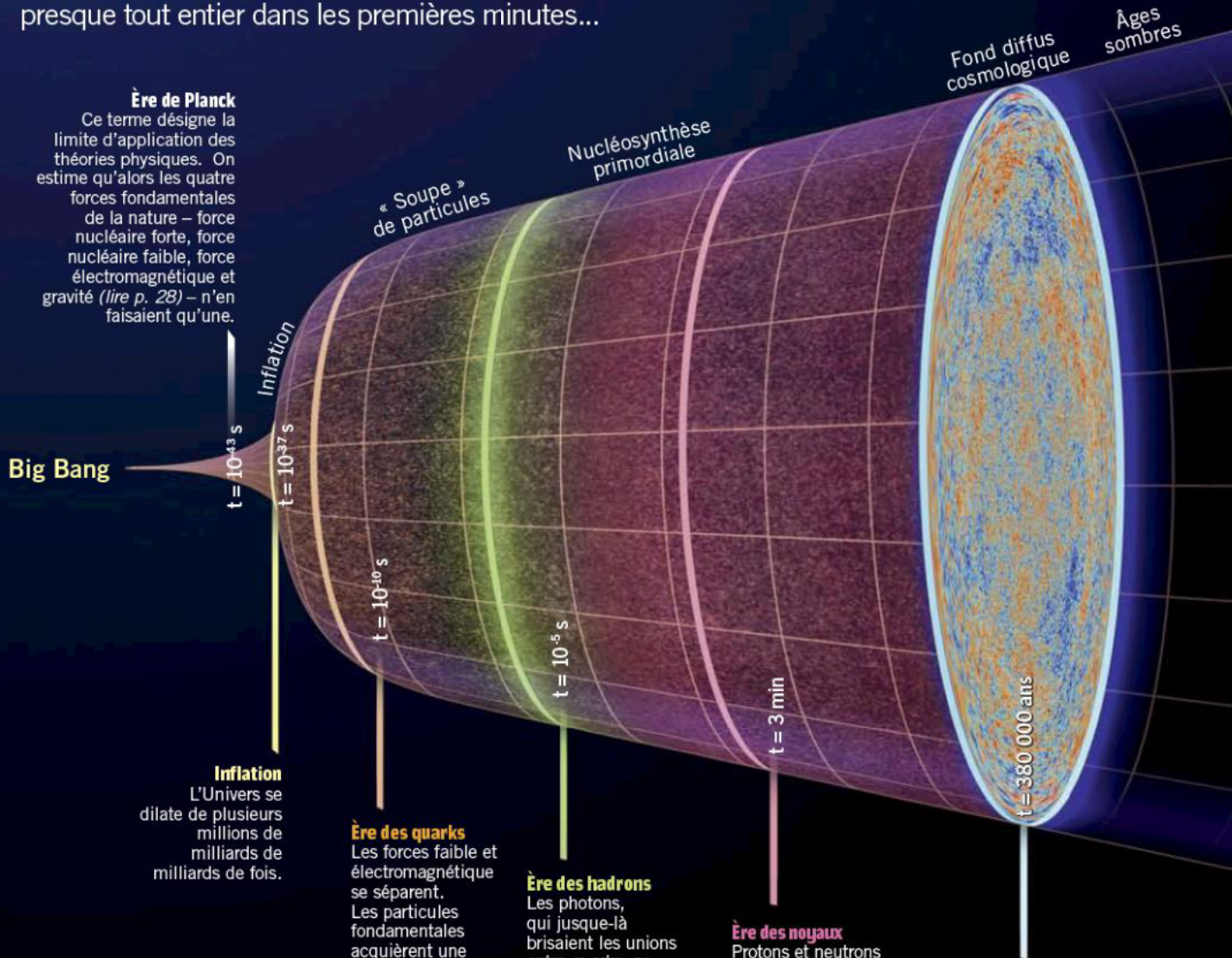
Notre Terre se trouve aux confins d'une incommensurable bulle nommée Laniakea, qui serait peuplée de 100 000 galaxies comparables à la Voie lactée… qui abrite elle-même des milliards de systèmes stellaires… Vertigineux !

Notre Système solaire est formé d'un ensemble de planètes : Mercure, Vénus, Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune, en orbite autour d'une étoile, le Soleil. Tous ces astres sont nés pratiquement en même temps, il y a 4,56 milliards d'années, de l'effondrement d'un nuage de gaz et de poussières : le centre a formé la jeune étoile, et la périphérie, le disque protoplanétaire où se sont constitués les globes. Notre Terre est à une distance de 8 minutes-lumière du Soleil. Neptune, la planète la plus éloignée, est à quatre heures-lumière et demie. Au-delà s'étend la ceinture de Kuiper, une multitude de petits corps rocheux enrobés de glace, réservoir des comètes.

lactée, notre galaxie, contient
illiards d'étoiles ordinaires
notre Soleil. Cette spirale barrée
on cent mille années-lumière
ses bras riches en étoiles et
ravers l'espace. La plupart des
s dans l'Univers lui ressemblent.
dotée en son centre d'un trou
permassif. Le Soleil est situé
dure du petit bras d'Orion, à
0 années-lumière du cœur.

QUEL EST L'ÂGE DE L'UNIVERS ?

13,79 milliards, c'est le nombre d'années qui se sont écoulées depuis le Big Bang, selon le modèle cosmologique en vigueur. Mais le destin du Cosmos s'est joué presque tout entier dans les premières minutes...



Ère de Planck
Ce terme désigne la limite d'application des théories physiques. On estime qu'alors les quatre forces fondamentales de la nature – force nucléaire forte, force nucléaire faible, force électromagnétique et gravité *(lire p. 28)* – n'en faisaient qu'une.

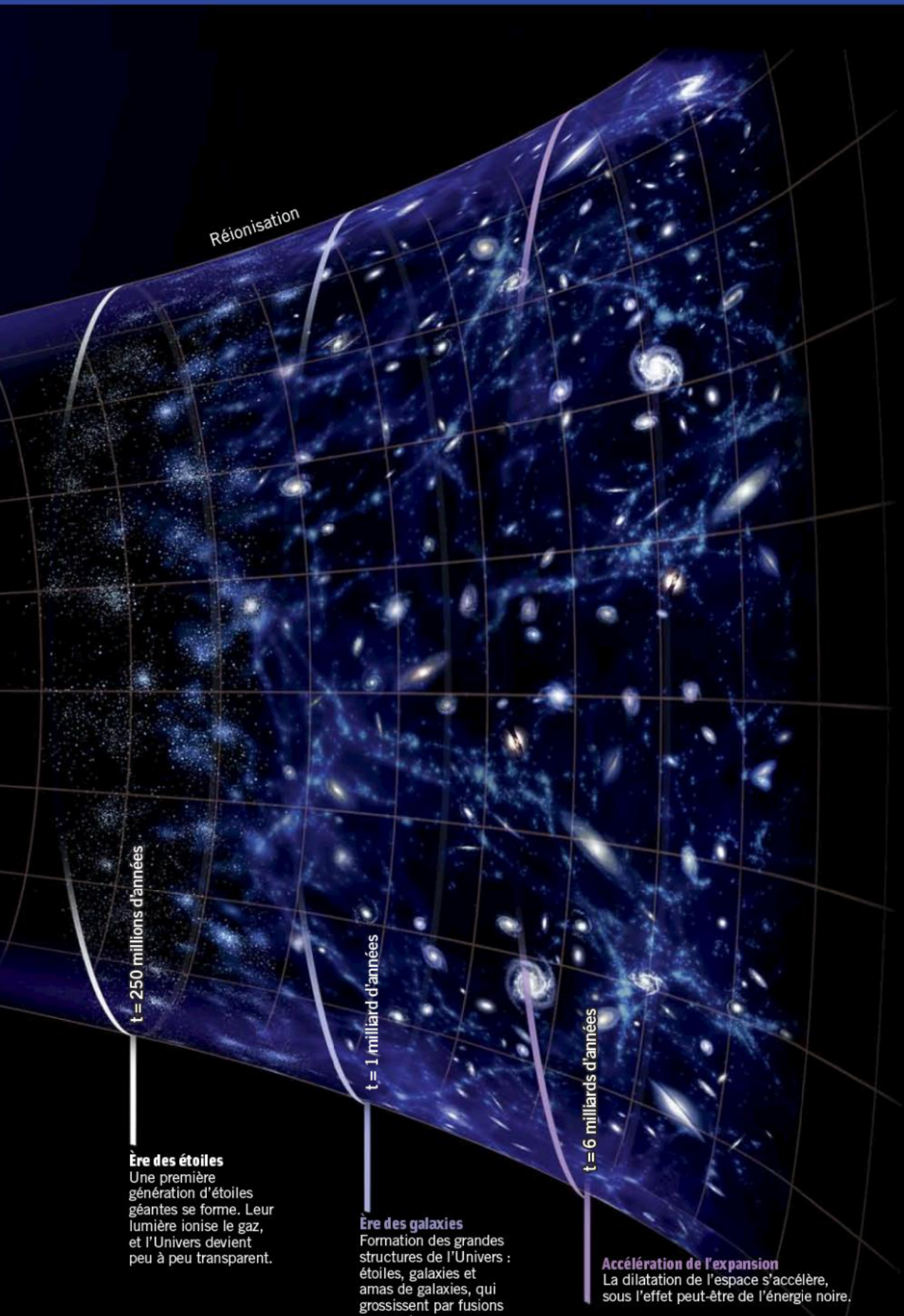
Inflation
L'Univers se dilate de plusieurs millions de milliards de milliards de fois.

Ère des quarks
Les forces faible et électromagnétique se séparent. Les particules fondamentales acquièrent une masse. L'Univers se refroidit rapidement.

Ère des hadrons
Les photons, qui jusque-là brisaient les unions entre quarks, ne sont plus assez énergétiques. Les quarks peuvent s'associer pour former les hadrons (protons et neutrons).

Ère des noyaux
Protons et neutrons commencent à se combiner en noyaux atomiques. Les électrons, libres, empêchent les photons de circuler dans l'espace, l'Univers est opaque. Toute la matière, visible et noire, est créée en quelques minutes.

Ère des atomes
Les photons sont libérés. Ils forment la première lumière de l'Univers. Les fluctuations de ce fond diffus cosmologique correspondent aux prémices des futures galaxies.


Réionisation
t = 250 millions d'années
t = 1 milliard d'années
t = 6 milliards d'années
Ère des étoiles
Une première génération d'étoiles géantes se forme. Leur lumière ionise le gaz, et l'Univers devient peu à peu transparent.
Ère des galaxies
Formation des grandes structures de l'Univers : étoiles, galaxies et amas de galaxies, qui grossissent par fusions successives.
Accélération de l'expansion
La dilatation de l'espace s'accélère, sous l'effet peut-être de l'énergie noire.

QU'Y A-T-IL DANS L'UNIVERS ?

LES CONSTITUANTS FONDMENTAUX : PARTICULES ET FORCES

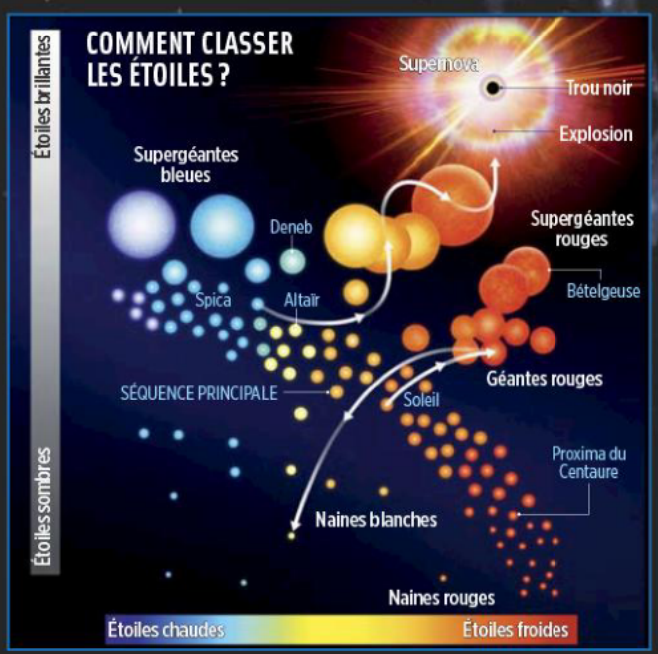
FERMIONS

	1re FAMILLE	2e FAMILLE	3e FAMILLE
Leptons Particules de matière insensibles à l'interaction forte qui assure la cohésion des noyaux.	**Électron.** Chargé négativement, il forme l'atome avec les nucléons (protons et neutrons) du noyau.	**Muon.** Cousin de l'électron, 200 fois plus lourd.	**Tau.** Cousin de l'électron, encore plus lourd, très instable.
	Neutrino-électron. Sans charge électrique et de masse très faible, il interagit rarement avec l'environnement.	**Neutrino-muon.** Créé en même temps que le muon. Propriétés semblables à celles du neutrino-électron.	**Neutrino-tau.** Créé en même temps que le tau. Mêmes propriétés que le neutrino-électron.
Quarks Particules de matière formant les hadrons (protons et neutrons).	**Up.** Charge électrique : +2/3. Un proton en contient 2, un neutron 1. **Down.** Charge -1/3. Un proton en contient 1, un neutron 2.	**Charm.** Cousin du quark up, plus lourd. **Strange.** Cousin du quark down, plus lourd.	**Top.** Cousin du quark up, encore plus lourd. **Bottom.** Cousin du quark down, encore plus lourd.

Selon le modèle standard, trois familles de quatre particules élémentaires, soit douze particules, constituent l'ensemble du monde. La matière ordinaire qui nous entoure est faite de particules de la première famille. Les autres ont peut-être existé au début du Cosmos, mais n'apparaissent aujourd'hui qu'à très haute énergie, dans les accélérateurs de particules, lors d'explosions d'étoiles ou collisions de trous noirs.

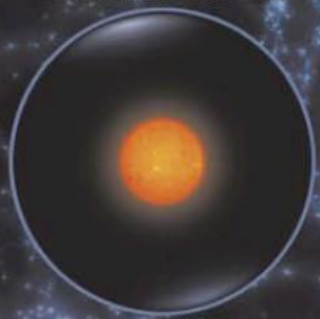
BOSONS

Les 12 bosons de jauge, ou particules de rayonnement, assurent la transmission des forces entre les briques de matière que sont les fermions.	**Photon.** Grain de lumière, vecteur de la force électromagnétique.	**Bosons W+, W- et Zo.** Vecteurs de l'interaction faible, responsables de formes de désintégration radioactive.	**Gluons.** Vecteurs de l'interaction forte, qui maintient les quarks dans les protons et les neutrons, et ces derniers dans le noyau.	**Le boson de Higgs** a donné leur masse aux autres particules, un dix milliardième de seconde après le Big Bang.

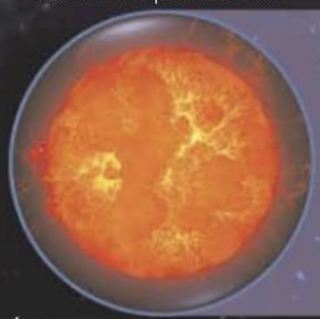


Ce diagramme classe les étoiles en fonction de leur température et de leur luminosité. Après une longue période dans la séquence principale, elles évoluent en fonction de leur masse : notre Soleil deviendra géante rouge puis naine blanche. Spica, dix foix plus massive, finira en supernova.

Planètes Sphères d'au moins 1500 kilomètres de diamètre, gravitant autour d'une étoile, n'émettant pas de lumière.



Naines rouges Étoiles peu massives et peu brillantes, à très longue durée de vie. Elles seraient les astres les plus nombreux.



Étoiles massives À cause de leur masse élevée, elles consomment très rapidement leur carburant.

Nébuleuses Ces nuages moléculaires de gaz et de poussières sont des pouponnières d'étoiles.

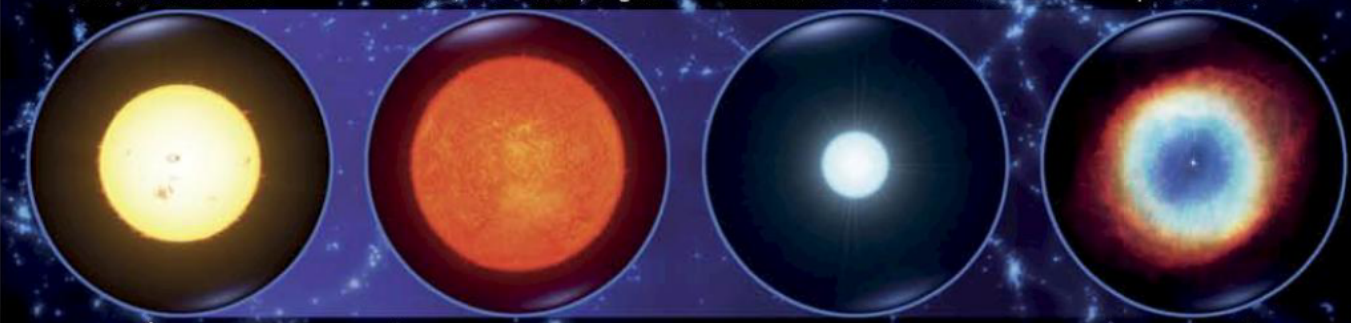
De ses plus infimes constituants aux grandes structures cosmiques, bestiaire de la matière visible... qui ne constitue que 4,9 % du Cosmos !

Petits corps Les planètes, telle ici Jupiter, peuvent posséder des satellites, corps plus petits qui orbitent autour d'elles.

Saturne Certaines planètes sont composées essentiellement de roches, comme la Terre et Mars, d'autres, telle Saturne, de gaz.

Naines brunes Étoiles ratées, pas assez massives pour produire des réactions nucléaires importantes. Leur luminosité est très faible.

Exoplanètes Planètes orbitant autour d'autres étoiles que notre Soleil. On en a détecté à ce jour plus de 4000.

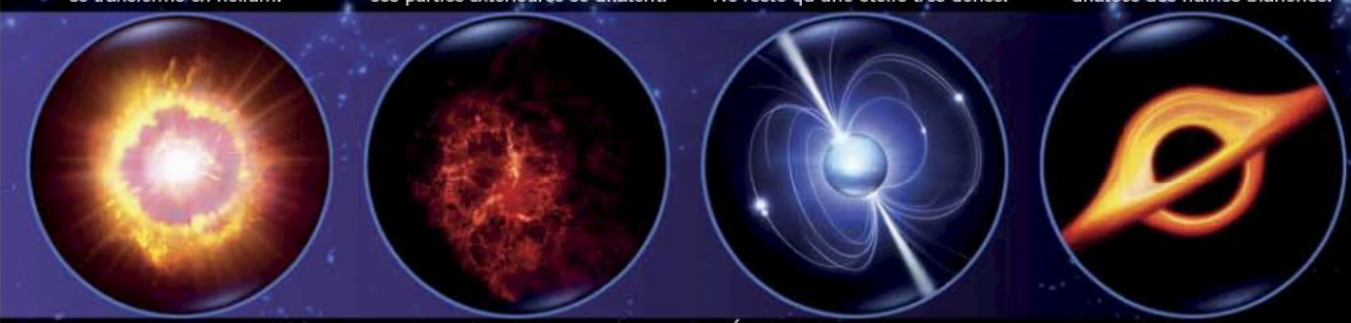


Naines jaunes Étoiles dont la masse varie de 0,7 à 1,2 fois celle du Soleil. En leur cœur, l'hydrogène se transforme en hélium.

Géantes rouges Lorsque la naine jaune a épuisé l'hydrogène, l'hélium devient son carburant, ses parties extérieures se dilatent.

Naines blanches Une fois l'hélium de la géante rouge épuisé, ses couches externes s'échappent. Ne reste qu'une étoile très dense.

Nébuleuses planétaires, Autrefois confondues avec des planètes, ce sont les enveloppes dilatées des naines blanches.



Supernovæ En fin de vie, les étoiles massives s'effondrent et éjectent leurs couches externes en une gigantesque explosion.

Restes de supernova En explosant, la supernova expulse les éléments lourds synthétisés durant la vie de l'étoile.

Étoiles à neutrons Lorsque le résidu de supernova s'effondre, il reste une étoile à neutrons, extrêmement compacte et dense.

Trous noirs Ils peuvent résulter de la fusion de deux étoiles à neutrons ou de l'effondrement d'une étoile massive.

Amas globulaires Sphères très denses contenant des centaines de milliers d'étoiles. La Voie lactée en compte 150.

Galaxies Disques d'étoiles, de gaz et de poussières. Elles peuvent être elliptiques, spirales comme la Voie lactée, ou irrégulières.

Amas de galaxies Galaxies unies par la force de gravitation. Les amas, en se liant entre eux, forment des superamas.

Outre la matière visible, qui représente 4,9 % de l'Univers, celui-ci est formé de 70,1 % d'énergie noire et 25 % de matière noire.

K2-18 b, la dernière « star » des exoplanètes : massive comme sept à huit fois la Terre, elle a récemment fait l'actualité quand on a découvert que son atmosphère comportait de la vapeur d'eau. Vue d'artiste.

ALEX BOERSMA

Exoplanètes : en quête d'habitabilité

Plus de 4000 ! C'est le nombre de ces corps extrasolaires détectés à ce jour. Les télescopes les scrutent toujours plus précisément afin de savoir si certains ne donneraient pas signes de vie.

PAR JEAN-FRANÇOIS HAÏT

« On a découvert de l'eau dans l'atmosphère d'une exoplanète située dans la zone habitable de son étoile. » Le 11 septembre dernier, les médias et les réseaux sociaux du monde entier s'enflammaient après un communiqué de la Nasa ainsi titré. Il dévoilait les travaux d'une équipe menée par Angelos Tsiaras, de l'University College de Londres, publiés dans la revue *Nature Astronomy*, à propos d'une planète appelée K2-18b. Repérée par le télescope spatial Kepler en 2015, K2-18b a depuis été observée en détail par le télescope Hubble. Et les particularités de son spectre lumineux dénotent, en effet, la présence de vapeur d'eau dans son atmosphère… Reste que découvrir de l'eau dans l'Univers n'est pas follement original. Elle abonde dans tous les recoins du Cosmos : les satellites de Jupiter (Europe, Ganymède, Callisto…), par exemple, en recèlent en quantité. Et la première détection de vapeur d'eau dans l'atmosphère d'une exoplanète, une géante gazeuse du type de Jupiter, remonte à… 2007. Pourquoi, alors, cette effervescence ?

C'est que la planète détectée aujourd'hui ressemble bien davantage à notre Terre, par la masse tout au moins (estimée à 7 à 8 fois la masse terrestre, contre plus de 300 fois pour Jupiter). Et qu'elle se ●●●

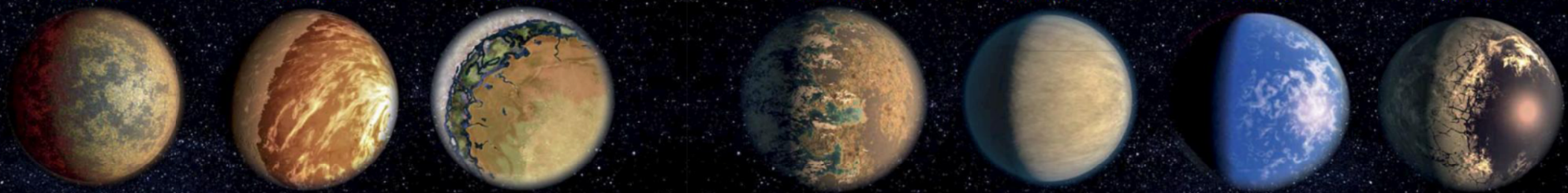
Un site qui répertorie les exoplanètes en « zone habitable » : www.hzgallery.org/7

Luvoir, le projet de télescope spatial géant de la Nasa : https://asd.gsfc.nasa.gov/luvoir

Encyclopédie des exoplanètes : www.exoplanet.eu

Un peu d'eau, un soupçon de gaz, et tout change...

L'astrophysicien Martin Turbet a modélisé le climat possible des exoplanètes du système Trappist, découvert en 2016. Selon la quantité d'eau et celle de gaz à effet de serre présentes dans leur atmosphère, et pour des planètes en rotation synchrone (présentant toujours la même face à leur étoile), il a établi sept scénarios possibles, très hypothétiques. Vues d'artiste.



Scénario 1 — Planète avec très peu d'eau, très peu d'atmosphère au départ, qu'elle perd rapidement par érosion due au vent de l'étoile. Elle ressemble à Mercure.

Scénario 2 — Même planète que 1 avec un peu plus d'eau, très peu d'atmosphère. L'eau migre sur la face nocturne de la planète où elle se condense en glaciers aux points les plus froids.

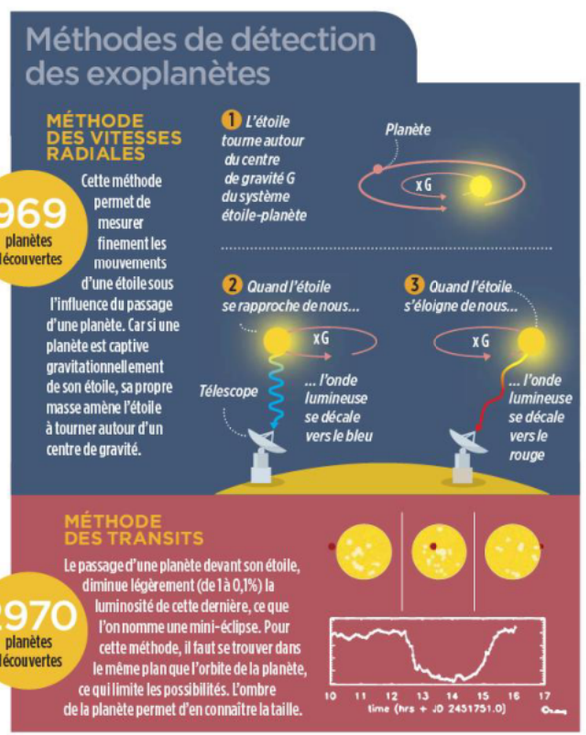
Scénario 3 — Même planète que 2 avec un peu plus d'atmosphère : le glacier s'étale, fond à la limite jour-nuit, formant des lacs et des rivières.

Scénario 4 — Même planète que 3 avec une atmosphère plus abondante qui provoque un effet de serre suffisant pour empêcher la formation de glace. De l'eau s'accumule dans les dépressions du relief, du côté sombre.

Scénario 5 — On augmente encore l'effet de serre sur la planète 4 : toute l'eau de surface s'évapore, elle est piégée dans l'atmosphère. Planète ressemblant à Vénus, mais plus riche en eau.

Scénario 6 — On augmente la quantité d'eau sur la planète 5 : l'atmosphère devient saturée, l'eau se condense sur toute la surface de la planète. C'est une « planète océan ».

Scénario 7 — Même planète que 6, mais avec un effet de serre moindre : l'océan gèle, sauf à un point correspondant au zénith de l'étoile. La planète prend un aspect de globe oculaire.



MEHDI BENYEZZAR

●●● trouve de surcroît dans la « zone habitable » de son étoile ; autrement dit, à une distance de celle-ci compatible avec la présence d'eau liquide, le solvant indispensable à toutes les réactions chimiques de la vie. Une présence potentielle qui suscite bien des fantasmes. Résultat : une seconde équipe, celle de Björn Benneke de l'université de Montréal (Canada), a publié en catastrophe des travaux sur le même objet *(lire l'encadré p. 33)*.

Très proche de son étoile, 51 Pegasi b boucle sa révolution en quatre jours

Mais qu'une planète soit située dans la « zone habitable » n'assure pas qu'elle abrite la vie… Car cette région ne peut être définie qu'*a minima*, comme un secteur dont la température permet à l'eau de se maintenir à l'état liquide. Un climat plus chaud, et l'eau se vaporise. Plus froid, et elle gèle. *« Cette expression désigne plutôt une zone d'exclusion*, explique Franck Selsis, chercheur au Laboratoire d'astrophysique de Bordeaux. *On sait où l'eau liquide ne peut pas se trouver. »* En effet, que l'eau se maintienne à l'état liquide nécessite au moins une autre condition : une pression atmosphérique suffisante. Ce qui n'est pas le cas sur Mars, notamment : il y a bien de l'eau… mais à l'état de glace. Quant à l'atmosphère des exoplanètes, on en ignore tout, ou presque.

À commencer par la plus célèbre d'entre elles, 51 Pegasi b. En 1995, l'astronome suisse Michel Mayor *(lire l'interview p. 36-38)* et son étudiant d'alors, Didier Queloz, révèlent leur incroyable découverte : un objet massif qui tourne autour de l'étoile 51 Pegasi b. C'est la première « exoplanète » annoncée comme telle. Une découverte pour laquelle les deux scientifiques se sont vu décerner le prix Nobel de physique en 2019. Vingt-cinq ans plus tard, un extraordinaire bestiaire s'est constitué. *« La barre des 4 000 exoplanètes confirmées a été passée au printemps 2019 »*, explique Jean Schneider, de l'observatoire de Paris-Meudon, qui les recense depuis 1995 dans une encyclopédie en ligne accessible à tous et en publie toutes les données d'intérêt scientifique. Sans compter les 2 500 « candidates » en attente de validation par les experts.

Reste que la définition d'une planète fait toujours l'objet de beaucoup de débats. *« Entre 6 et 60 fois la masse de Jupiter, un objet a autant de chances d'être une planète qu'une naine brune »*, note Jean Schneider. Autrement dit une petite étoile ratée, dont la fusion nucléaire n'a jamais démarré, et constituée uniquement de gaz.

La planète rocheuse, meilleur candidat *a priori* pour faire naître la vie

Sur les 4 000 planètes recensées, près de 900 ont été détectées par la méthode des vitesses radiales et près de 3 000 par celle des transits *(voir l'in-* ●●●

DOMAINE PUBLIC - RARE EARTH/DR - NASA - NASA - CREATIVE COMMONS - NASA/JPL CALTECH

Un univers impitoyable !

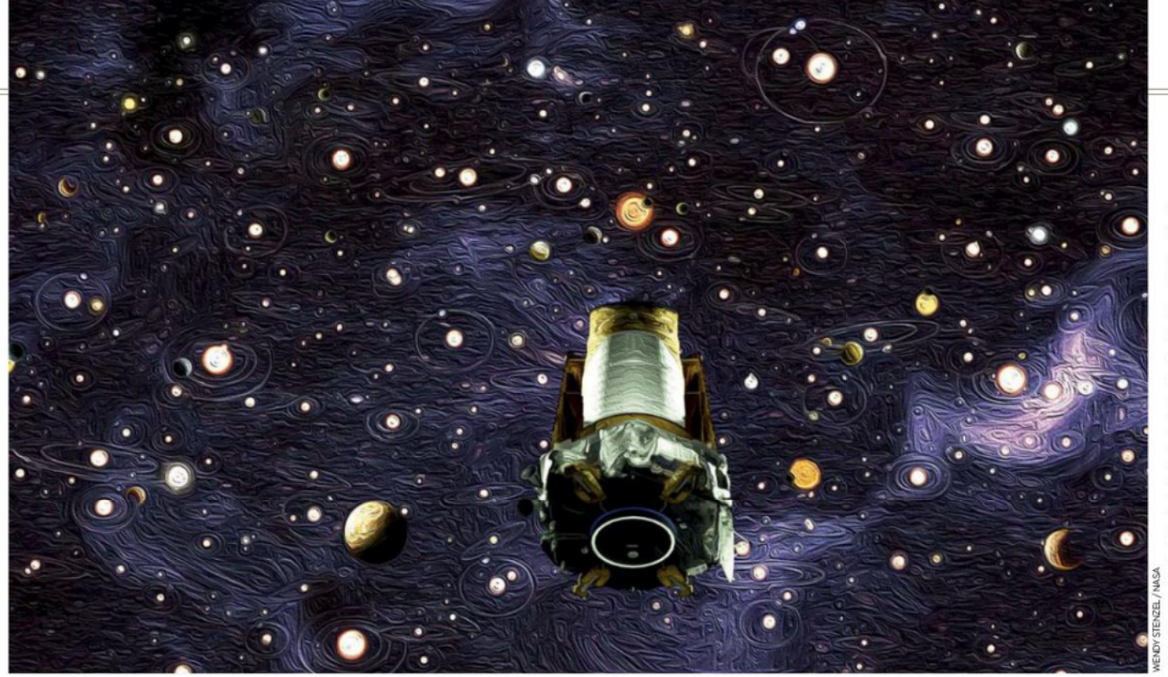
Le 11 septembre 2019, la publication de l'équipe d'Angelos Tsiaras (University College de Londres) dans *Nature Astronomy* fait sensation : il y a de la vapeur d'eau dans l'atmosphère de K2-18 b, petite exoplanète située en « zone habitable » de son étoile. Une découverte pourtant déjà… rendue publique la veille. En effet, c'est une autre équipe, celle de Björn Benneke (université de Montréal, Canada), qui avait fait faire par Hubble les observations aboutissant à cette découverte. Mais les données du télescope spatial sont en accès public, sans exclusivité. L'équipe Benneke a-t-elle été prévenue de l'imminence d'une publication par l'équipe Tsiaras ? Toujours est-il qu'elle poste le 10 septembre, sur le site ArXiV, qui stocke les publications scientifiques non encore validées par les experts, un article qui rapporte lui aussi la détection de vapeur d'eau dans l'atmosphère de K2-18 b.

Mais les Canadiens vont plus loin : selon eux, les simulations d'atmosphère de l'exoplanète sont toutes compatibles avec la présence d'eau liquide sous forme de nuages, pouvant donner de la pluie à la surface. Une hypothèse qui n'a pas été médiatisée. En effet, elle est loin de faire l'unanimité dans la communauté scientifique… Voici qui témoigne de la fébrilité d'équipes pour lesquelles l'obtention de temps d'observation sur les télescopes et de crédits de recherche dépend aussi de la visibilité médiatique. L'univers des exoplanètes est décidément impitoyable.

Nature Astronomy, 11 septembre 2019 ; https://arxiv.org/abs/1909.04642

Premier indice dans la Chevelure de Bérénice

Très grosse planète ou naine brune? Aujourd'hui encore, le statut de HD114762-b fait débat. Cet objet, découvert en 1989 par une équipe de chercheurs menée par l'astrophysicien américain David Latham, dont Michel Mayor faisait partie, tourne autour d'une étoile située à 132 années-lumière, dans la constellation de la Chevelure de Bérénice. C'est le premier objet extrasolaire détecté dont la masse est inférieure à celle d'une étoile. Autre découverte troublante : en 1993, l'astrophysicien américain Alexander Wolszczan, grâce au radiotélescope d'Arecibo, à Porto Rico, constate des irrégularités dans les émissions d'un… pulsar, l'une de ces étoiles à neutrons qui tournent très rapidement sur elles-mêmes en produisant un fort signal radio. Il les attribue à deux exoplanètes tournant autour du pulsar – une troisième a été découverte depuis… Mais leur étoile n'a rien à voir avec notre Soleil : c'est un objet de quelques kilomètres de rayon à peine, qui émet un rayonnement et un champ magnétique intenses, dont le voisinage est sans doute bien peu hospitalier. Et à une distance de 2 314 années-lumière, PSR B1257+12, c'est son nom, reste inaccessible à l'analyse.



WENDY STENZEL / NASA

Lancé en 2009 par la Nasa, le télescope spatial Kepler était consacré exclusivement à la détection d'exoplanètes par la méthode des transits. À l'achèvement de sa mission en octobre 2018, il en avait repéré 2346. Cette peinture le représente explorant la Voie lactée.

●●● *fographie p. 32)*. L'observation par les deux méthodes permet d'obtenir la masse de l'exoplanète et son diamètre, et donc de calculer sa densité moyenne. Les astronomes peuvent alors formuler des hypothèses sur sa composition : peu dense, c'est la dimension gazeuse qui domine ; très dense, elle a sans doute une forte composante rocheuse. Ce dernier type de planète est *a priori* le meilleur candidat pour faire naître la vie, car une croûte solide est capable de retenir de l'eau liquide mais aussi de servir de catalyseur à de nombreuses réactions chimiques.

Depuis son lancement en 2009, le télescope spatial Kepler en a découvert en grand nombre. Mais la plupart orbitent à des distances telles de leur étoile qu'elles se trouvent probablement en « rotation synchrone », comme la Lune autour de la Terre. Autrement dit, la durée d'une rotation de la planète sur son axe est égale à sa durée de révolution autour de l'étoile. Résultat : elle présente toujours la même face à son astre. *« La rotation synchrone complexifie le problème de l'habitabilité, car elle change considérablement les modèles climatiques des exoplanètes »*, souligne Franck Selsis.

Martin Turbet a consacré la thèse de doctorat qu'il a réalisée au Laboratoire de météorologie dynamique (LMD, Paris) à la modélisation du climat des exoplanètes. Car ni la nature présumée, ni même la composition chimique de l'atmosphère d'une exoplanète ne suffisent pour formuler des hypothèses quant à la présence d'eau liquide, et peut-être de vie. La Terre ne peut en abriter que parce qu'elle jouit de conditions climatiques favorables. Qu'en est-il sur les exoplanètes ? Le chercheur a pris pour objet d'étude le système Trappist. Cet extraordinaire ensemble de sept planètes a été découvert en 2016 par une équipe internationale menée par Michaël Gillon, de l'université de Liège (Belgique). Toutes sont de taille comparable à celle de la Terre, et trois d'entre elles, Trappist e, f et g, sont en zone « habitable ».

« Au LMD, nous avons pris pour base un modèle de climat global utilisé pour modéliser celui de la Terre, explique Martin Turbet. *Nous avons d'abord testé son aptitude à reproduire les climats des planètes du Système solaire, puis nous l'avons appliqué aux exoplanètes de Trappist. L'objectif est de simuler tous les processus possibles dans l'atmosphère des planètes et à leur surface. »* Le chercheur a ainsi réalisé des simulations numériques en faisant notamment varier deux paramètres : la quantité d'eau disponible sur la planète (quelle que soit sa forme), et l'épaisseur de l'atmosphère. Sept scénarios possibles ont alors émergé. *« Les sept hypothèses sont plausibles sur Trappist e, f et g,* précise le chercheur. *Quant aux autres planètes, Trappist b, c et d, très proches de l'étoile, elles subissent une violente irradiation qui fait très probablement s'évaporer l'atmosphère. »*

Martin Turbet a appliqué son modèle de climat à un autre système qui passionne les chercheurs : Proxima b, l'exoplanète la plus proche de nous. Elle tourne autour de l'étoile Proxima du Centaure, à 4,2 années-lumière de la Terre, et sa masse équivaut à 1,3 fois celle de notre planète. Proxima b recevrait, selon les estimations, entre 0,6 et 0,7 fois la lumière que la Terre capte du Soleil. Là encore, les sept hypothèses sont possibles.

Dans l'œil de Cheops, lancé le 17 décembre, des superterres et des minineptunes

Pour en éliminer un maximum, il faudra caractériser ces planètes et détecter les molécules qui composent leur atmosphère. En 2016, une équipe menée par Julien de Wit, du Massachusetts Institute of Technology, a pointé le télescope Hubble sur les exoplanètes de Trappist afin d'y chercher une atmosphère d'hydrogène, le gaz le plus abondant et le plus facile à détecter. Sans résultat… Ce qui laisse deux possibilités : *« Soit elles n'ont pas d'atmosphère, soit leur atmosphère est composée d'une autre molécule : celle qui abondait sur la Terre primitive et sur Mars, le dioxyde de carbone,* explique Martin Turbet. *Pour trancher, il faudra faire de la spectrographie plus détaillée. »*

C'est pour analyser avec précision l'atmosphère des exoplanètes les plus intéressantes que deux instruments hors normes, dans l'espace et au sol, seront mis en service d'ici quelques années : le télescope spatial James Webb, qui devrait être lancé en 2021, puis l'E-ELT (European Extremely Large Telescope), au Chili *(lire aussi p. 51-53)*. En attendant, l'heure est aux instruments plus petits. Les nouveaux spectrographes (Espresso, Harps 3) installés sur les télescopes du Chili et des Canaries vont rivaliser de précision. Dans l'espace, après Tess de la Nasa, Cheops (Caaracterising Exoplanet Satellite), de l'Esa, devait décoller le 17 décembre 2019 de Kourou. Son objectif : mesurer très précisément la densité de « superterres » et de planètes un peu plus grosses, les « minineptunes ». En 2024, Plato (Planetary Transits and Oscillations of stars) partira détecter des exoplanètes de la taille de la Terre en zone habitable.

Enfin, il est permis de rêver sur Luvoir (Large UV Optical Infrared Surveyor), un extraordinaire concept de la Nasa. Ce télescope spatial multifonction, gigantesque (un diamètre de 15 mètres est envisagé) pourra réaliser des images des exoplanètes et analyser leur atmosphère pour y détecter l'eau, l'oxygène moléculaire (O_2), l'ozone, le CO_2, le méthane… autrement dit de potentielles « biosignatures » : des molécules dont la nature et surtout l'abondance impliquent qu'elles sont produites par des organismes vivants. Lancement prévu en 2038… au mieux. Pour l'heure, la vie sur les exoplanètes n'est pas un sujet pour les scientifiques. Parvenir à déterminer si elles sont habitables est même encore un objectif lointain… *« Cela prendra plusieurs décennies,* souligne Franck Selsis. *Ce n'est pas une question d'instruments, mais de compréhension de l'extraordinaire diversité des exoplanètes. Tout reste à découvrir. »* ■

EN CHIFFRES

La plus grosse :
R0Xs 42B b, 9 fois la masse de Jupiter

La plus petite :
Kepler 37 b :
0,3 rayon terrestre

Orbite la plus courte :
NLTT 5306 b :
3 millions de kilomètres
Période orbitale :
1,69 jour

Orbite la plus longue :
HD 118865 B
1380 milliards de kilomètres – Période orbitale inconnue

Nombre de systèmes à plusieurs planètes :
près de 700

Nombre record de planètes dans un système : 8 autour de l'étoile Kepler 90

SOURCE : JEAN SCHNEIDER – EXOPLANET.EU

Luz Casal

SIPA

MICHEL MAYOR* MON ŒUVRE D'ART PRÉFÉRÉE

« Durant mes nuits d'observation au Chili, je puise un grand réconfort dans l'écoute des grandes œuvres de la musique classique. Le *Requiem* de Mozart, par exemple, que je diffuse à volume maximal ! J'apprécie aussi beaucoup la musique espagnole et sud-américaine, les chanteuses comme Luz Casal ou Celia Cruz. Et lorsque j'ai un peu de temps, je cours les musées d'art précolombien au Chili, en Colombie ou au Pérou. »

* Prix Nobel de physique 2019

interview

MICHEL MAYOR
Astrophysicien, professeur émerite à l'université de Genève

« La Terre est un paradis, comparée à tous les objets célestes que nous connaissons ! »

L'astronome suisse, qui a reçu le prix Nobel de physique 2019, souligne les progrès techniques et théoriques qui ont permis de révéler l'extraordinaire diversité des exoplanètes. Et affirme la nécessité de protéger une planète unique : la nôtre.

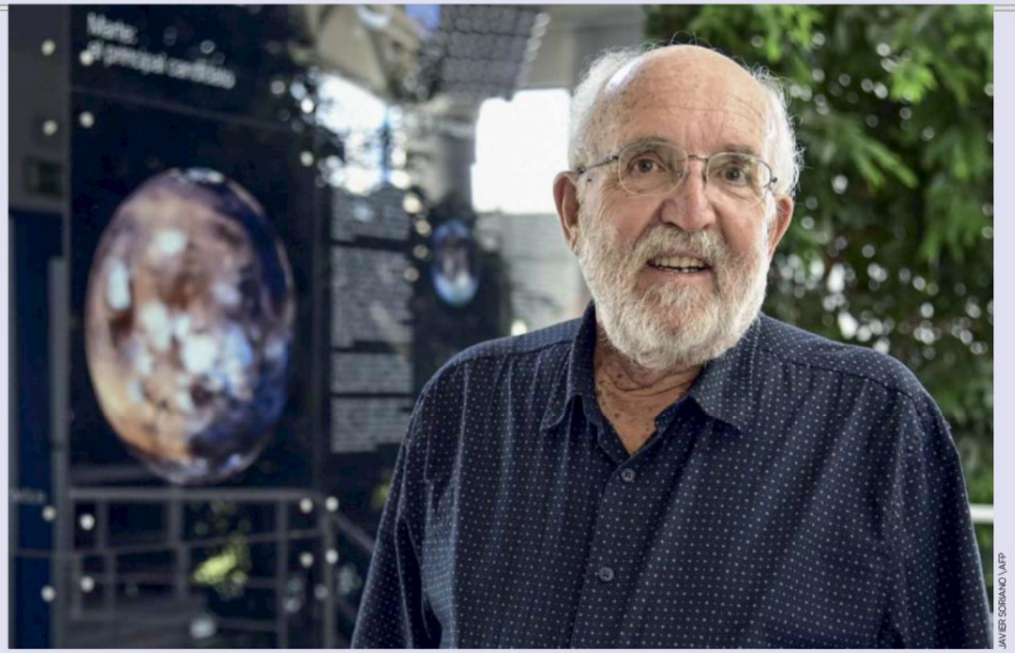
Le 8 octobre 2019, vous avez reçu le prix Nobel de physique avec Didier Queloz pour la découverte de la première exoplanète, 51 Pegasi b, en 1995. Quel a été votre sentiment lorsque vous avez appris la nouvelle ?
Un grand bonheur ! D'autant que beaucoup d'autres travaux en physique méritaient ce prix. Il est vrai que l'on citait mon nom depuis longtemps, mais chaque année, ça tombait à l'eau ! J'avais donc cessé de m'en préoccuper... J'étais en voyage en Espagne lorsque j'ai appris la nouvelle. J'étais venu à Madrid donner une conférence et je me suis trouvé pris dans un tourbillon médiatique qui n'a pas cessé depuis.

À qui souhaiteriez-vous dédier ce prix Nobel ?
C'est la récompense d'un travail d'équipe sur près de trente ans, avec la construction d'instruments de pointe et de nombreuses missions d'observation, au Chili notamment. Je pense en particulier à André Baranne, un spécialiste français de l'optique, sans lequel nous n'aurions jamais pu fabriquer des spectrographes aussi performants. Je lui dédie ce prix ainsi qu'à tous ceux qui ont développé les instruments et les logiciels indispensables à notre recherche. Quant à Didier Queloz, qui était étudiant en thèse sous ma direction à l'époque, il a conçu un système ingénieux capable de traiter les données recueillies au sortir du spectrographe et de les afficher en temps réel, ce qui nous a permis de réagir très vite alors que les autres équipes mettaient plus longtemps à exploiter leurs données. Cela nous a conféré un avantage déterminant !

Aujourd'hui, on compte plus de 4 000 exoplanètes confirmées. Quel chemin parcouru depuis 51 Pegasi b !
Ce chemin a débuté au milieu du XX[e] siècle… bien avant 51 Pegasi b ! Jusque-là, la science-fiction avait imaginé quantité de nouveaux mondes, mais l'astronomie scientifique considérait que les exoplanètes – si elles existaient – devaient être extrêmement rares. En effet, une des thèses les plus en vogue, celle de l'astronome anglais James Jeans, stipulait que le Système solaire s'était formé suite à une collision entre le Soleil et une autre étoile, un événement dont la probabilité était très faible. Il a fallu attendre les travaux théoriques du physicien soviétique Otto Schmidt à partir des années 1940, et les premières observations de la rotation des étoiles par l'astronome russo-américain Otto Struve en 1952, pour montrer que les planètes se forment par accrétion dans un disque de matière autour de l'étoile – de petits objets, les planétésimaux, s'agrègent pour en former de plus gros – et que le phénomène est sans doute très courant dans l'Univers. J'aime rappeler l'existence de ces pionniers un peu oubliés par l'Histoire.

À quand remontent les preuves observationnelles ?
Ces disques de matière dits « protoplanétaires » ont d'abord été détectés indirectement par spectroscopie dans les années 1970 : on a réussi à observer un excès de rayonnement infrarouge en plus du spectre stellaire, ce qui indiquait la présence de poussières autour de l'étoile. Puis, en 1995, le télescope spatial Hubble a fait les premières images des disques entourant les étoiles jeunes de la nébuleuse d'Orion. La même année, avec Didier Queloz, nous avons annoncé l'existence de 51 Pegasi b !

Qu'avez-vous ressenti lorsque vous l'avez découverte ?
Ce fut une énorme surprise ! Même si découvrir une exoplanète était notre objectif. Nous avions pour cela mis au point un spectrographe de haute précision, baptisé Elodie. Installé à l'Observatoire de Haute-Provence, il était conçu pour détecter les planètes de la taille de Jupiter que l'on appelle « géantes gazeuses ». Mais nous avons été stupéfaits de trouver une telle planète aussi près de son étoile. Elle boucle une orbite en à peine quatre jours ! Fin 1994, quand nous avons soupçonné sa présence pour la première fois, cela nous paraissait tellement incroyable que nous avons attendu l'été suivant pour refaire des observations, afin de nous assurer qu'il ne s'agissait pas d'un effet transitoire dû, par exemple, au champ magnétique de l'étoile. Mais non, on voyait toujours cette variation de vitesse régulière qui témoignait de la présence d'une planète…


JAVIER SORIANO / AFP

« Ce n'est pas parce qu'on a trouvé de l'eau dans son atmosphère qu'une exoplanète abrite forcément de la vie »

Comment a-t-on pu détecter par la suite autant d'exoplanètes ?
Grâce aux progrès accomplis sur les instruments. Aujourd'hui, nous sommes capables d'observer la variation de la vitesse radiale d'une étoile – c'est-à-dire l'oscillation que lui imprime une planète qui tourne autour d'elle – à 20 centimètres par seconde près. La Terre seule fait bouger le Soleil de 8 centimètres par seconde. On se rapproche donc de la détection de planètes de petite taille par cette méthode.
Quant à l'observation des transits – les éclipses que provoquent les planètes en passant devant les étoiles –, la première a été réalisée en 1999 grâce à des télescopes au sol, puis réitérée dans l'espace par Hubble l'année suivante. Cette première a inauguré la conception de télescopes spatiaux dédiés à la détection de ces phénomènes : Corot, puis Kepler qui a découvert une foule de planètes, auxquels succéderont bientôt Cheops et Plato… On a ainsi repéré quantité d'exoplanètes et de nombreux systèmes à plusieurs planètes. Les données recueillies grâce aux deux méthodes ont également permis de formuler des hypothèses sur leur nature : gazeuses, rocheuses, recouvertes de glace ou d'un océan...

Peut-on envisager de découvrir de la vie sur les exoplanètes ?
Pas directement, car on ne pourra jamais s'y rendre. Mais on pourrait identifier des biosignatures dans leur atmosphère, autrement dit des espèces chimiques dont l'abondance témoigne d'une activité biologique au sol. L'ozone, par exemple, qui est un marqueur de la production d'oxygène par des organismes vivants. En revanche, ce n'est pas parce qu'on a trouvé de l'eau dans l'atmosphère d'une exoplanète que celle-ci abrite forcément de la vie.
Je déplore le battage médiatique autour de K2-18 b *(lire*

●●● *p. 30-35).* C'est exagéré ! Avant de débattre de la présence d'eau liquide, il faudrait comprendre les mécanismes de formation planétaire, la « géophysique » des exoplanètes, si l'on peut dire. Sur une exoplanète de cinq à huit fois la masse de la Terre, y a-t-il de la tectonique des plaques ? On ne le sait pas. Or, ce phénomène a joué un grand rôle dans le maintien sur Terre d'une température qui a permis la naissance de la vie. Quant à la détection des biosignatures… Ne perdons pas de vue qu'une planète comme la Terre a une atmosphère extrêmement fine. Analyser celle d'une exoplanète nécessitera l'utilisation de spectrographes à très haute résolution, installés sur des télescopes spatiaux ou au sol sur de très grands instruments comme le futur ELT (Extremely Large Telescope) en construction au Chili.

NIELS ACKERMANN / LUND13

« Il convient de dire que nous n'irons sans doute jamais visiter les exoplanètes, parce que les distances entre les étoiles sont absolument gigantesques »

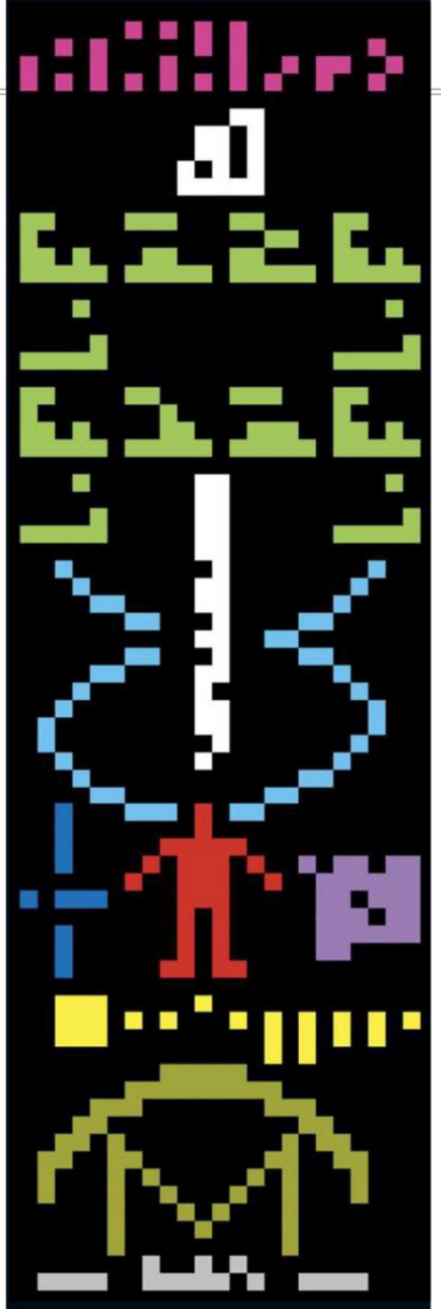
Quels ont été les moments les plus gratifiants de votre carrière… et les plus difficiles ?
Je vais sans doute vous surprendre, mais les plus gratifiants ne sont pas forcément ceux de la découverte de 51 Pegasi b ou d'autres planètes. Ainsi, l'une de mes plus grandes joies reste liée à la « première lumière » : la mise en service d'un nouveau spectrographe, auquel mon équipe et moi-même avons consacré des années d'études. Qu'il s'agisse d'Elodie, en Provence, ou de Harps, au Chili, quelques années après. Nous l'installons sur le télescope, nous mettons le contact et tout fonctionne parfaitement : les spectres, les mesures de vitesses radiales sont à la précision que nous attendions !

Quant aux moments les plus pénibles, nous les avons probablement vécus pendant les années 2000. À cette époque, la compétition avait pris une tournure très rude entre groupes de recherche, notamment avec ceux des Américains Geoffrey Marcy et Paul Butler. Chacun voulait annoncer une découverte le premier. Entre nous, c'était *fair play*, mais certains médias américains un peu chauvins avaient tendance à minimiser nos découvertes. Aujourd'hui, ces rivalités n'ont pas totalement disparu, mais l'heure est aux grandes collaborations qui permettent à toutes les équipes d'accéder aux différents instruments.

Vous êtes aujourd'hui à la retraite. À quoi occupez-vous votre temps ?
Je suis professeur émérite, ce qui me décharge d'un certain nombre de responsabilités ! Je participe encore à plusieurs programmes de recherche, en particulier aux Canaries et au Chili. Surtout, je donne beaucoup de conférences… Parfois trop ! Transmettre au public constitue désormais une part importante de mon activité. Il y a un véritable enthousiasme pour les exoplanètes. Il convient d'en profiter pour expliquer notre science de manière raisonnable. Dire par exemple que nous n'irons sans doute jamais les visiter, parce que les distances entre étoiles sont absolument gigantesques.

Est-ce à dire qu'on ne pourrait quitter la Terre même si on le voulait ?
Je milite contre l'idée qu'il y a un plan B, une planète B. C'est une énorme stupidité qui se cache derrière une forme de scientisme. Qu'on explore Mars, c'est très bien, cela peut donner des réponses à des questions scientifiques importantes, comme savoir si la vie a pu s'y développer. Mais imaginer qu'on va fuir une Terre devenue inhabitable et aller « terraformer » Mars pour y vivre, c'est absurde. Il faut avant tout protéger notre planète. La Terre est un paradis, comparée à tous les objets célestes que nous connaissons. J'ai toujours été convaincu qu'il fallait défendre notre environnement. Désormais, aidé sans doute par le prix Nobel, je ferai passer systématiquement ce message : écoutez les scientifiques qui nous alertent sur le réchauffement du climat !

PROPOS RECUEILLIS PAR JEAN-FRANÇOIS HAÏT



Le message d'Arecibo a été lancé en 1974 en direction de l'amas d'Hercule, à 25 000 années-lumière de la Terre. Il comporte des symboles représentatifs de la vie sur Terre : les chiffres de 1 à 10, des éléments constitutifs de l'ADN ainsi qu'un croquis de la double hélice, une silhouette d'humain, une représentation du Système solaire… L'image originale était en noir et blanc.

SPL

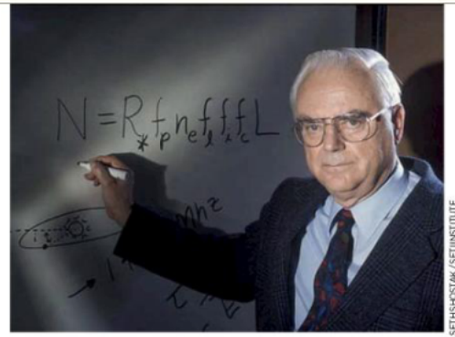
Depuis un demi-siècle, les Terriens tendent l'oreille et envoient dans l'espace toutes sortes de signaux, dans l'espoir d'y faire d'heureuses rencontres… En vain.

Le silence assourdissant des extraterrestres

Une « *infinité de mondes* » : trois siècles avant notre ère, le philosophe grec Épicure (342-270 av. J.-C.), dans une célèbre *Lettre à Hérodote*, conjecturait déjà que les humains n'étaient pas seuls dans l'Univers. L'hypothèse est donc dans l'air depuis longtemps… Il fallut cependant attendre le XIXe siècle pour qu'elle se précise. *« De grands scientifiques théorisent alors l'existence d'autres civilisations »*, raconte Florence Raulin-Cerceau, exobiologiste et historienne des sciences au centre Alexandre-Koyré. *Le mathématicien allemand Carl Friedrich Gauss est sans doute le premier à formuler des solutions pour nous signaler aux extraterrestres. Les mathématiques étant à ses yeux un langage universel, il suggère de dessiner dans la steppe sibérienne une vaste figure géométrique visible de l'espace, illustrant le théorème de Pythagore. En France, l'astronome Camille Flammarion propose en 1862 des figures géométriques évolutives, comme un triangle se transformant en carré. »*
Au XXe siècle, pourtant, les scientifiques semblent faire volte-face, et s'intéresser aux civilisations extraterrestres est mal vu dans le milieu. Mais en 1959, la très sérieuse revue *Nature* publie un article intitulé « Searching for Interstellar Communications » (À la recherche de communications interstellaires), signé par deux chercheurs de l'université Cornell, Giuseppe Cocconi et Philip Morrison. Si des êtres intelligents existent ailleurs dans l'Univers, ils cherchent certainement à contacter leurs semblables, estiment les auteurs. Qui formulent des hypothèses sur le fond et la forme de leurs messages.

Epsilon Eridani et Tau Ceti, deux étoiles sur écoute…

Malgré ce signe d'ouverture, il faut du courage à l'astronome américain Frank Drake pour oser demander en 1960 l'accès à un radiotélescope dans le but de détecter d'éventuels signaux provenant d'une intelligence extraterrestre. Ayant obtenu gain de cause, il écoute pendant 150 heures les étoiles Tau Ceti et Epsilon Eridani… sans résultat. L'année suivante, il publie la fameuse « équation de Drake », qui évalue le nombre probable de ●●●



SETHSHOSTAK/SETIINSTITUTE

L'astronome Frank Drake a mis en équation le nombre probable de civilisations extraterrestres dans la Galaxie.

●●● civilisations avec lesquelles nous pourrions entrer en contact au sein de notre galaxie. Cette formule est le produit de sept facteurs hypothétiques évaluant le nombre de planètes, les probabilités d'apparition de la vie, de l'intelligence, des technologies… et l'espérance de vie d'une civilisation. Voilà lancée l'aventure Seti (Search for Extra-Terrestrial Intelligence, ou Recherche d'intelligences extraterrestres). En 1984 est créé le Seti Institute, à Mountain View (Californie), co-fondé par l'astronome Jill Tarter qui propose de reformuler son objet. Il s'agit désormais de rechercher des « technosignatures » : des traces observables d'activités technologiques, à l'image de nos émissions radio. Depuis, des signaux étranges ont agité plus d'une fois cette communauté *(lire l'encadré p. 41)*. Mais toujours rien. L'événement le plus marquant dans la période récente est sans doute la découverte en 1995 de la première exoplanète confirmée.

« *Ce que nous avons surtout appris, c'est que la plupart des étoiles possèdent des planètes,* estime Seth Shostak, astronome au Seti Institute. *Cela nous amène à penser que nous devons viser tous ces astres.* »

Lorsqu'on imagine des extraterrestres, telle la créature ci-dessous, il faut tenir compte des conditions régnant sur la planète qu'ils sont censés habiter. Ainsi, la masse de celle-ci impose une limite supérieure à leur taille. Et leur vue doit être adaptée à leur environnement.

DIDIER FLORENTZ POUR SCIENCES ET AVENIR

Avec des radiotélescopes plus puissants ? « *Plus de sensibilité, c'est peut-être tout ce dont nous avons besoin,* suppose l'astronome. *Mais si nous parions sur des signaux radio, nous ne pourrons détecter qu'une civilisation dotée d'un gigantesque outil émettant en permanence. Alors que dans le domaine optique, la prochaine génération de télescopes géants pourrait nous permettre de détecter de simples artefacts.* » Les Égyptiens ont bien construit les pyramides… pourquoi une planète très avancée n'exhiberait-elle d'immenses constructions, par exemple des antennes ?

Dans le domaine radio, le Ska, pour Square Kilometre Array, pourrait être une bonne source de détections. Il s'agit d'un projet international de gigantesque radiotélescope en réseau qui devrait être doté, à terme, d'une surface collectrice totale d'un kilomètre carré. Après deux ans passés au Berkeley Seti Research Center, le chercheur français Gregory Hellbourg travaille sur ce projet pharaonique à l'Icrar (International Centre for Radio Astronomy Research), à Perth (Australie). « *On ne peut rien négliger,* estime-t-il. *Il est logique de pointer nos antennes en direction de toute exoplanète qui nous semble susceptible d'héberger la vie, et de tout phénomène astronomique que nous ne pouvons expliquer par des causes naturelles. Mais il faut aussi écouter dans toutes les directions. Il sera sans doute plus facile de capter d'abord un signal conçu pour être perçu comme artificiel. Je pense à un signal radio très propre, comme la nature n'en produit pas, une sinusoïde parfaite.* »

La Terre, zoo d'humains ?

En 1950, le physicien et prix Nobel italien Enrico Fermi se posait en substance la question : *« S'il y a des milliards de planètes dans notre galaxie, pourquoi n'avons-nous pas encore été visités par une civilisation extraterrestre ? »* Depuis, les réponses pleuvent.

Commençons pas les pessimistes. La théorie du « grand filtre » imagine que, sur le chemin menant d'une planète minérale à sa transformation par une civilisation capable de conquérir la Galaxie, il existerait un goulet d'étranglement. Il a fallu trois milliards d'années pour passer de la bactérie à l'animal : coup de chance ? La civilisation terrienne serait alors une rareté, voire un cas unique. Ou peut-être des civilisations technologiques apparaissent-elles ici et là, de temps à autre, mais s'autodétruisent sans avoir le temps de communiquer avec un *alter ego*.

Plus optimistes, certains défendent l'idée que ces ET pourraient exister mais, pour une raison ou une autre, ne chercheraient pas à nous le faire savoir. Attendent-ils que nous fassions le premier pas ? Nous pourrions être observés et considérés comme une civilisation « primitive », qu'il ne faut pas perturber – c'est l'hypothèse du « zoo cosmique ».

L'étrange objet baptisé Oumuamua est le premier observé venant de l'espace interstellaire.

ESO/M. KORNMESSER

Mais la mise en service du Ska ne devrait pas intervenir avant 2030. « *En attendant, nous pouvons faire du bon travail avec des instruments récents comme le Lofar (Pays-Bas),* assure Gregory Hellbourg. *Et en France, à Nançay, il y a Nenufar, un formidable radiotélescope basse fréquence inauguré en octobre dernier* » *(lire p. 67)*. Il sera à terme le plus sensible au monde dans sa gamme de fréquences : 10 à 85 MHz. « *Avec un collègue de Nançay, je prépare une expérience pour explorer une hypothèse amusante : si des civilisations très avancées émettent des signaux focalisés vers d'autres susceptibles de les recevoir, nous pourrions nous trouver sur le trajet. Nous nous intéressons donc à un grand nombre de paires d'étoiles alignées avec la Terre, et dirigerons Nenufar dans leur direction.* »

Un radiotélescope sur la face cachée de la Lune

« *À plus long terme, une idée exaltante est d'installer un radiotélescope sur la face cachée de la Lune, à l'abri des parasites terrestres, en profitant de la courbure d'un cratère* », s'enthousiasme Élisabeth Pietolat, coordinatrice pour la France de la Seti League, une association réunissant astronomes professionnels et amateurs passionnés par la recherche de ET. Une idée que défend aussi Joseph Silk, de la Johns Hopkins University (Baltimore, Maryland) et de l'Institut d'astrophysique de Paris.

Écouter ET, c'est bien, mais si on lui parlait, aussi ? En 1974, un message concocté par Frank Drake et Carl Sagan est émis vers l'amas globulaire M13 par le radiotélescope d'Arecibo, à Porto Rico. Ce « message d'Arecibo » comporte une image en noir et blanc de 73 par 23 pixels. Deux nombres premiers. Depuis, les choses sont devenues plus sérieuses. « *En 2015, Douglas Vakosh, un ancien du Seti, a fondé Meti International (Messaging ExtraTerrestrial Intelligence)* », explique Élisabeth Pietolat.

Mais faut-il vraiment envoyer des messages en direction d'autres civilisations ? « *Je ne crois pas que cela soit risqué,* estime Seth Shostak. *De toute façon, ceux qui les recevraient ne seraient plus très loin d'être capables de capter les radars de l'aéroport Charles-de-Gaulle…* » Gregory Hellbourg se montre plus circonspect. « *Nous ignorons tout des intentions à notre égard d'une civilisation beaucoup plus avancée. Pourrait-elle être prédatrice ? La prudence est peut-être la bonne posture… Ce qui est certain, c'est que la question doit être débattue par tous.* » Florence Raulin-Cerceau est plus enthousiaste. « *De toute façon, nous émettons toutes sortes de signaux… Que faut-il envoyer ? Peut-être de la musique : c'est une façon de parler de nous.* » ■ PIERRE VANDEGINSTE

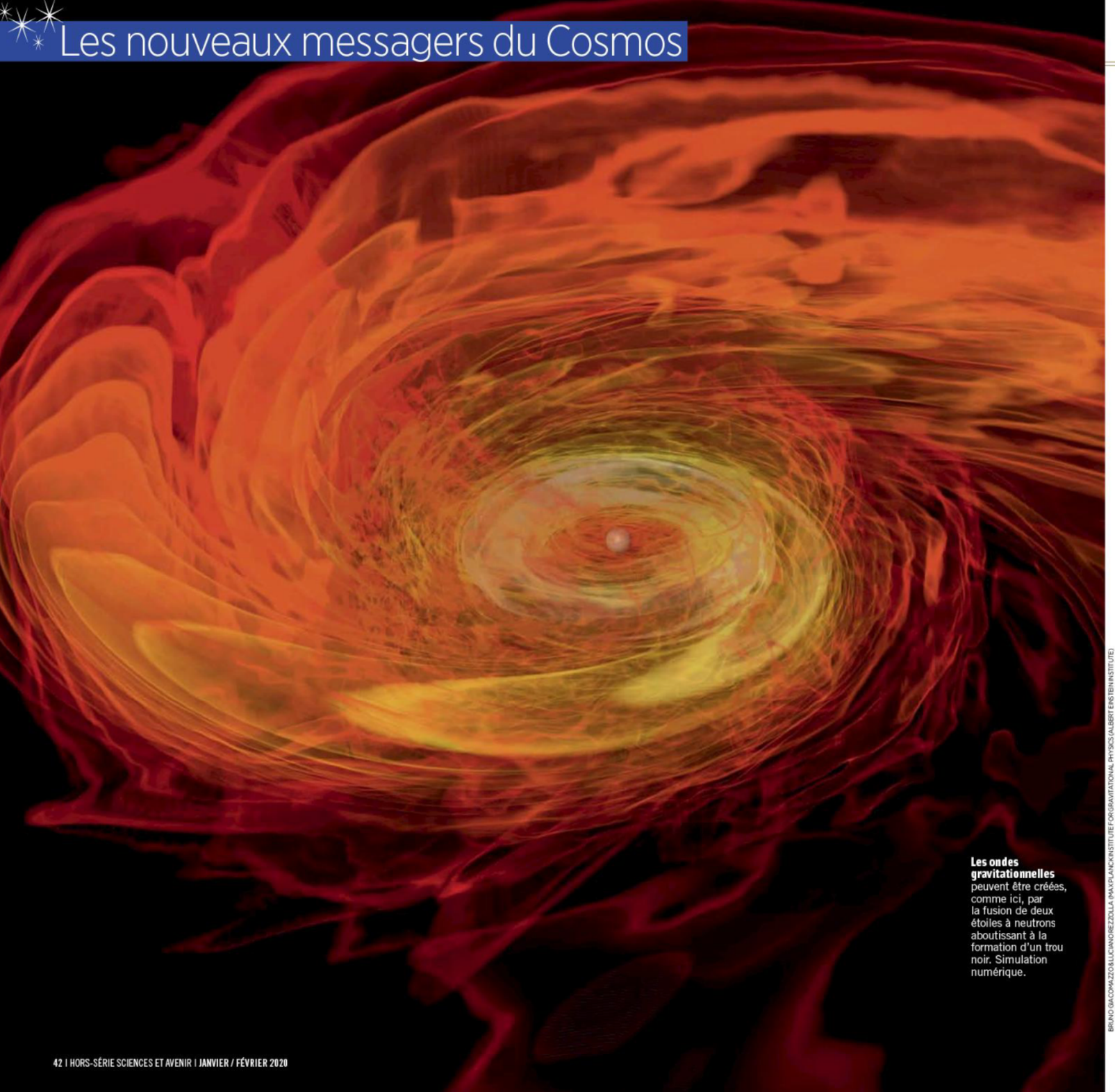
Fausses alertes à répétition

1977 - Le signal « Wow ! ». Le 15 août, un signal de 72 secondes capté par le radiotélescope de l'université d'État de l'Ohio ne ressemble à rien de connu. L'hypothèse cométaire, proposée en 2016, est loin de faire consensus.

2007 - Les sursauts radio rapides. Dès leur découverte en 2007, les FRB (Fast Radio Bursts) intéressent le Seti. Leurs caractéristiques, notamment leur brièveté (de l'ordre de la milliseconde) ne les rapprochent d'aucun phénomène astronomique connu à l'époque. Surtout FRB 121102, un signal très répétitif (200 fois en cinq ans) mais non périodique. Leur origine est extragalactique… et probablement naturelle *(lire p. 48-50)*.

2015 - Tabby's Star. Cette étrange étoile, découverte par l'astronome Tabetha Boyajian, clignote de manière erratique. Certains veulent reconnaître en elle la présence d'une « mégastructure » artificielle destinée à capter l'énergie de l'étoile. Le Seti Institute ne détecte aucun signal radio. De multiples hypothèses naturelles (poussière interstellaire, comètes…) ont été proposées. On a depuis détecté deux douzaines d'étoiles similaires.

2017 - Oumuamua. C'est le premier objet d'origine extrasolaire observé… dans le Système solaire. De plus, ce caillou a vraiment une drôle de forme : un cigare volant venu d'une autre civilisation ? Seti Institute ne détecte aucune émission radio… Depuis, on a découvert Borisov, un second objet extrasolaire de passage autour de notre Soleil *(lire p. 77)*.



Les ondes gravitationnelles peuvent être créées, comme ici, par la fusion de deux étoiles à neutrons aboutissant à la formation d'un trou noir. Simulation numérique.

BRUNO GIACOMAZZO&LUCIANOREZZOLLA (MAXPLANCKINSTITUTEFORGRAVITATIONAL PHYSICS(ALBERT EINSTEIN INSTITUTE)

À la découverte de l'Univers invisible

Grâce aux observations combinées de différents signaux cosmiques, dont les ondes gravitationnelles, les scientifiques accèdent aujourd'hui à la compréhension d'objets qui jusqu'ici leur échappaient, comme les trous noirs.

PAR JACQUES-OLIVIER BARUCH

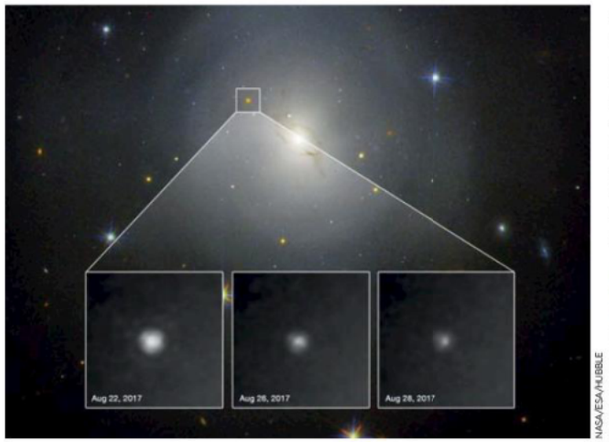
C'est l'histoire d'un spasme. Un tout petit spasme d'à peine 10 millionièmes de milliardième de millimètre. Le 14 septembre 2015, à 4 heures, 50 minutes et 45 secondes, à Livingston (Louisiane, États-Unis), l'interféromètre optique Ligo sommeille... quand, soudain, ses deux bras perpendiculaires de quatre kilomètres de long s'allongent brièvement avant de raccourcir. Sept millisecondes plus tard, à 3 000 kilomètres de là, le second interféromètre Ligo, situé à Hanford (État de Washington), enregistre la même secousse. Cela fait à peine deux jours que les instruments sont en fonction et, déjà, ils captent cet infime tressautement dont – pas de doute ! – la forme et la durée trahissent une ondulation de l'espace-temps sous l'effet du passage d'une onde gravitationnelle.

C'est une nouvelle confirmation d'une prédiction d'Albert Einstein en 1916 : l'espace-temps, la structure même de notre Univers, se déforme sous l'effet de la gravitation. Et cette force est d'autant plus intense que les objets sont massifs. Quand deux corps comme des trous noirs ou des étoiles à neutrons se rapprochent, ils entament une forme de « danse », décrivant des spirales de plus en ●●●

Le site du détecteur européen Virgo : www.virgo-gw.eu

Nathalie Deruelle, Jean-Pierre Lasota : *Les Ondes gravitationnelles*, Odile Jacob, 2018

Application Gravitational Wave Events : Chargez l'application pour Iphone afin de recevoir, comme la communauté scientifique, les alertes de détection des ondes gravitationnelles et la recherche de leurs contreparties optiques ou de neutrinos.



NASA/ESA/HUBBLE

La « kilonova » issue de la fusion de deux étoiles à neutrons dans la galaxie NGC 4993, le 17 août 2017, a perdu son éclat en seulement quelques jours. L'événement a été détecté par les interféromètres Ligo et Virgo grâce aux ondes gravitationnelles alors émises. Image obtenue par le télescope spatial Hubble.

●●● plus rapides l'un autour de l'autre… jusqu'à fusionner en un seul et même astre. À ce moment, ils émettent une onde violente qui ébranle l'Univers tout entier. Une onde comme celle qui a trahi, ce matin du 14 septembre 2015, la naissance – à 1,3 milliard d'années-lumière de la Terre – d'un monstre galactique de 62 fois la masse du Soleil, issu de la fusion de deux trous noirs de respectivement 29 et 36 masses solaires – les trois masses solaires manquantes étant converties en énergie dissipée sous la forme de cette vague spatiale.

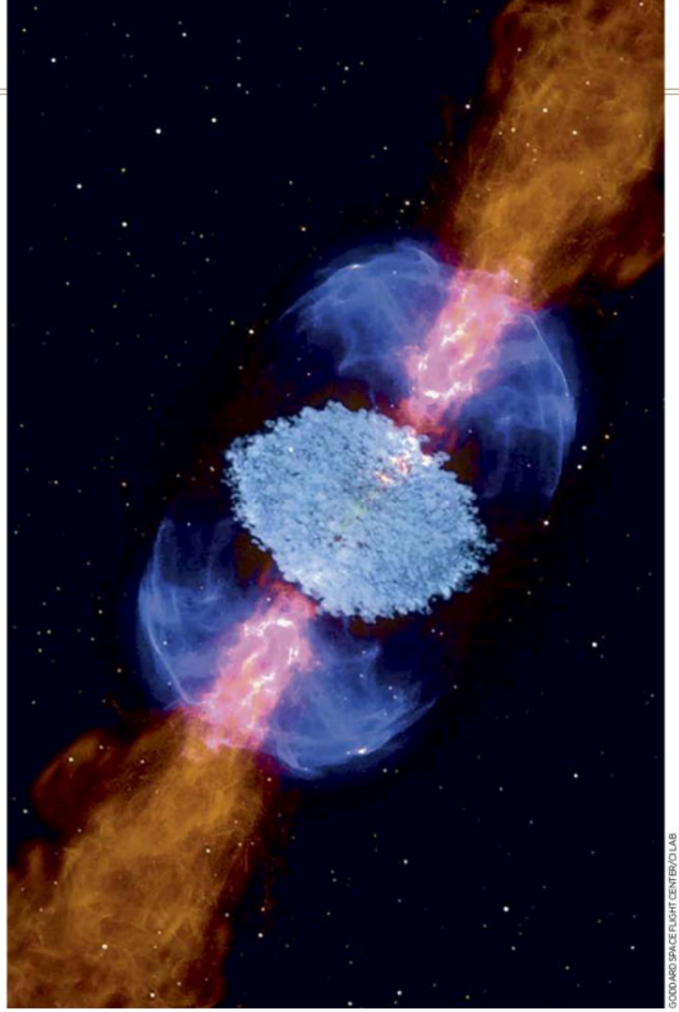
Cet événement révélé en février 2016 a été salué dans le monde entier. L'année suivante, le CNRS décernait sa médaille d'or à deux physiciens français : Alain Brillet, concepteur du système laser des détecteurs d'ondes gravitationnelles, et Thibault Damour, dont les travaux théoriques ont été déterminants dans l'analyse des données *(lire l'interview p. 47)*. De son côté, le comité Nobel attribuait le prix de physique aux Américains Barry Barrish, Kip Thorne et Rainer Weiss *« pour leurs contributions décisives au détecteur Ligo et à l'observation des ondes gravitationnelles »*. Une nouvelle astronomie était née : les ondes gravitationnelles permettent en effet d'étudier les événements qui n'émettent pas de lumière, comme les profondeurs des trous noirs ou le tout début de l'Univers. En 2016, Virgo, le troisième détecteur mondial, installé près de Pise, en Italie, a renforcé le dispositif. En attendant Kagra, le japonais mis en service fin 2019, puis Ligo-India, qui devrait être implanté près de Mumbai en 2024… si les fonds sont réunis cette année.

À deux reprises, on a suspecté la digestion d'étoiles à neutrons par des trous noirs

Très rapidement, les découvertes se sont enchaînées. D'abord des fusions de trous noirs, événements les plus faciles à détecter. Dix ont d'ores et déjà été confirmées, et neuf autres décelées par une équipe de Princeton grâce à une nouvelle analyse des données recueillies. *« Les dix premières étaient étonnantes, car neuf des nouveaux trous noirs formés avaient une rotation atypique*, remarque Thibault Damour. *Mais ceux de Princeton sont dans les clous. »*

Le 17 août 2017, les interféromètres détectent un nouvel événement bien différent : la forme et la durée – plus de 100 secondes – du signal émis indiquent qu'il est cette fois dû à la fusion de deux étoiles à neutrons, des astres hyperdenses nés de l'explosion d'étoiles massives en supernova. Deux ans plus tard, le 14 août puis le 30 septembre derniers, est suspectée la digestion d'étoiles à neutrons par des trous noirs. Mais ces deux événements demandent encore confirmation car, d'après les prévisions, un tel festin cannibale n'aurait pu être repéré sans l'apport de Kagra. De même, une trentaine de détections de fusions de trous noirs doivent encore être vérifiées.

Les candidats confirmés, eux, peuvent désormais livrer leurs secrets. Mais comment les faire parler ? C'est là qu'interviennent les travaux de Thibault Damour : le physicien a montré que la forme des ondes gravitationnelles qu'ils génèrent révèlent leurs caractéristiques (masse, rotation, distance). Mais où se trouvent ces ogres ? La marge d'erreur est grande. Une imprécision due à l'événement lui-même, mais aussi au nombre limité d'instruments capables de le dépister. En 2015, la fusion des deux trous noirs détectée par les seuls Ligo américains s'était produite… quelque part dans une région du ciel de plus de 179 degrés carrés, soit 640 fois la surface de la Lune ! Avec le concours de Virgo, la région concernée a été réduite à 87 degrés carrés pour la fusion de deux trous noirs le 14 août 2017, et 16 degrés carrés pour la fusion de deux étoiles à neutrons repérée trois jours plus tard. Avec Kagra, ce type d'événement pourra être localisé dans un angle de 3,8 degrés carrés. Puis 2,3 degrés carrés une fois Ligo-India en service… si les détecteurs enregistrent tous un signal assez fort.



©GODDARD SPACE FLIGHT CENTER/CI LAB

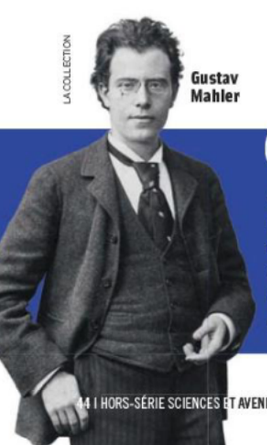
La fusion des deux étoiles à neutrons le 17 août 2017 a envoyé dans l'espace de puissants jets de rayons gamma (en rose), et des débris de matière qui ont produit des rayons ultraviolets (en violet). La détection de ces rayonnements par des instruments sensibles à ces longueurs d'onde a confirmé l'événement repéré grâce aux ondes gravitationnelles. Image extraite d'une vidéo de la Nasa, https://www.ligo.caltech.edu/video/ligo20171016v2.

Les détecteurs d'ondes gravitationnelles rejoignent ainsi la batterie d'instruments permettant d'explorer le visible et l'invisible. Certains, comme les téléscopes, étudient les événements cosmiques grâce aux ondes électromagnétiques qu'ils émettent. D'autres, les phénomènes qui parfois les accompagnent : ondes gravitationnelles, donc, ou production de particules peu massives comme les neutrinos, ou même rayons cosmiques, protons ou noyaux d'hélium *(voir l'infographie p. 46)*. Chacun de ces messagers apporte son lot de renseignements sur la nature de l'astre étudié. L'avènement de cette astronomie dite multimessagers a eu lieu il y a plus de trente ans. On peut même le dater avec une précision étonnante : le 23 février 1987, quand des détecteurs japonais et américains captent une vingtaine de neutrinos juste avant que des télescopes chiliens n'annoncent l'explosion d'une étoile dans le Grand Nuage de Magellan. Depuis, la chasse aux messagers multiples s'est organisée.

Ondes gravitationnelles, neutrinos, rayons cosmiques… Chacun de ces messagers apporte son lot d'informations sur la nature de l'astre étudié

Le déroulé de la découverte du 17 août 2017 est à cet égard édifiant : à 14 h 41 min 20 s (heure française), les Ligo et Virgo détectent le signal de la fusion de deux étoiles à neutrons. Aussitôt, l'alerte mondiale est lancée. Les grands instruments optiques, comme le Very Large Telescope européen, au Chili, se mettent en quête, tout comme les télescopes spatiaux à rayons gamma Integral et Fermi, les détecteurs de neutrinos IceCube et Antares, basés respectivement au pôle Sud et en Méditerranée, ainsi que l'observatoire de rayons cosmiques Pierre-Auger, en Argentine. Les équipes d'Integral et Fermi s'aperçoivent que moins de deux secondes après la réception des ondes gravitationnelles, elles ont toutes deux capté un flash de rayons gamma. Preuve qu'il a été émis lors de la collision de ces deux étoiles mortes. Près de 70 télescopes braquent alors leurs optiques sur la zone et c'est le petit télescope Swope qui, treize heures seulement après l'alerte, réussit à localiser précisément une source lumineuse transitoire dans la ●●●

LA COLLECTION

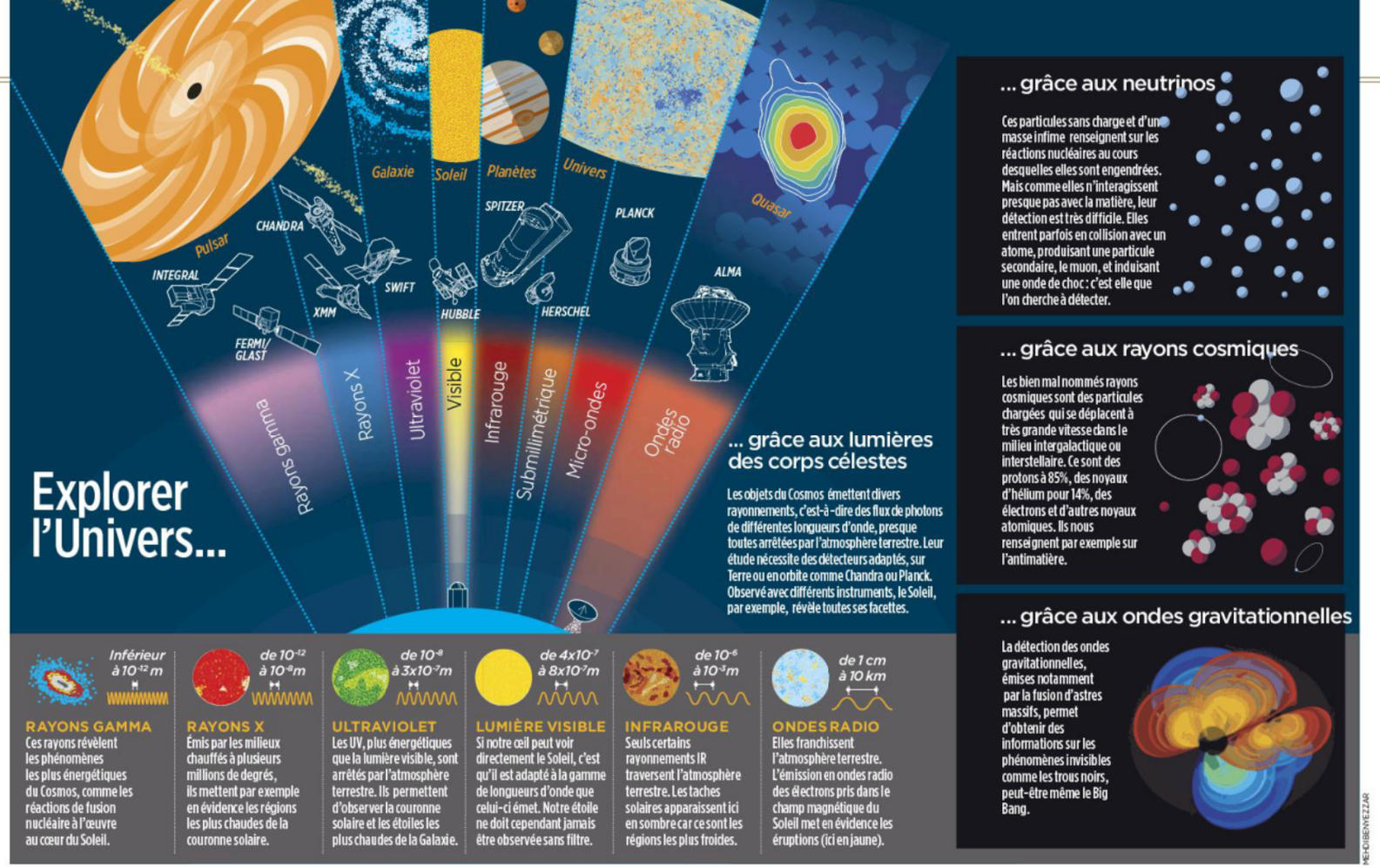


Gustav Mahler

THIBAULT DAMOUR* MON ŒUVRE D'ART PRÉFÉRÉE

« Je suis physicien théoricien et pianiste, mais je ne mélange pas mes deux passions. Néanmoins, une de mes œuvres favorites est "Ich bin der Welt abhanden gekommen", un des cinq *Rückert-Lieder* de Gustav Mahler. J'ai eu le plaisir d'interpréter ce lied avec, au chant, Virginie Landré, l'épouse d'un des collaborateurs du détecteur d'ondes gravitationnelles Ligo. La traduction du titre est : "Me voilà coupé du monde". Faut-il y voir un des aspects de la vie d'un physicien théoricien ? »

* Professeur à l'Institut des hautes études scientifiques, médaille d'or du CNRS



●●● constellation de l'Hydre… à 130 millions d'années-lumière de la Terre. Les observations suggèrent que la lumière émise provient de la matière des étoiles à neutrons éjectée lors de la fusion : en heurtant la matière, les neutrons libérés ont généré des noyaux plus lourds que celui du fer, tels que ceux du plomb, de l'or ou du platine. Certains de ces noyaux étant radioactifs et instables, ils se sont désintégrés, produisant le rayonnement observé. Ce phénomène, moins lumineux qu'une supernova, est baptisé « kilonova ». Dans cette course à la détection, l'observatoire Pierre-Auger n'a rien vu… Et si Antares et IceCube ont détecté des neutrinos moins de dix minutes après la réception des ondes gravitationnelles, la direction d'origine de ces particules n'était pas compatible avec l'événement.

Aujourd'hui, de nombreux réseaux de détection d'ondes gravitationnelles fonctionnent, tels Growth aux États-Unis, dirigé par le California Institute of Technology (Caltech), Master pour la Russie et Grandma en Europe, mis en place il y a moins de deux ans par la Française Sarah Antier, du laboratoire Astroparticules et Cosmologie de l'université Paris-Diderot. Avec ses collègues de 13 pays, elle a créé un réseau de 24 télescopes répartis tout autour du globe pour suivre les alertes et détecter la signature visible d'une kilonova. *« Après chaque alerte lancée par les détecteurs d'ondes gravitationnelles, nous attribuons à chacun un secteur d'observation,* détaille l'astrophysicienne. *Nous pouvons réagir en moins de 16 minutes après l'événement. »* Avis aux astronomes amateurs : ils sont invités à rejoindre cette aventure avec le programme Kilonova-Catcher. Il suffit de pointer les galaxies proposées avec un télescope de plus de 20 centimètres de diamètre, d'ouvrir assez longtemps son objectif pour atteindre au moins la magnitude 18, et d'envoyer les images observées sur un serveur dédié.

Pour traquer les objets célestes, les astrophysiciens tentent de capturer toutes les informations qu'ils émettent : lumière, particules, ou encore les traces qu'ils laissent sur la trame de l'espace-temps, les ondes gravitationnelles.

Les astrophysiciens ont donc désormais dans leur besace des fusions de trous noirs ou d'étoiles à neutrons. Des astres de petite masse par rapport aux trous noirs géants qui se nichent au cœur des galaxies, et dont la fusion émet des ondes gravitationnelles de si grandes longueurs d'onde que leur observation demande des détecteurs immenses : des interféromètres de plusieurs millions de kilomètres. Ce sera le cas en 2034 avec Lisa, un interféromètre spatial géant composé de trois satellites formant un triangle équilatéral de 2,5 millions de kilomètres de côté ! *« Lisa nous permettra de voir notamment la fusion de trous noirs supermassifs à des distances couvrant l'essentiel de l'Univers observable »,* remarque Olivier Minazzoli, de l'observatoire de la Côte d'Azur, membre de la collaboration Ligo-Virgo. Les trous noirs et autres étoiles à neutrons n'ont qu'à bien se tenir. Tous, petits et gros, seront bientôt mis à nu. ■

« interview

THIBAULT DAMOUR
Professeur à l'Institut des hautes études scientifiques (IHÉS) de Bures-sur-Yvette (Essonne)

« Nous allons pouvoir approfondir notre connaissance des trous noirs »

R. GAILLARD/REA

La détection des ondes gravitationnelles, en 2015, est-elle la plus grande découverte de ces cent dernières années?
L'une des plus grandes, cela ne fait aucun doute ! Mais leur réalité avait déjà été montrée en 1974 par les Américains Russell Hulse et Joseph Taylor, grâce à la découverte d'un couple de pulsars tournant l'un autour de l'autre et dont la période orbitale diminuait, ce qui, selon la théorie, devait correspondre à l'énergie perdue sous forme d'onde gravitationnelle. Cela a même valu aux deux physiciens le prix Nobel en 1993. La grande nouvelle que ces ondes apportent aujourd'hui est l'existence incontestable des trous noirs puisque nous avons pu observer la fusion de leurs horizons, la limite en deçà de laquelle la lumière ne peut plus ressortir de ces astres. Ce n'est plus une preuve indirecte, comme celle déduite de l'émission de rayons X par des sources doubles ou de la très belle, très médiatisée mais reconstruite image du trou noir de la galaxie M87.

Quelles avancées peut-on en attendre?
Avec la sensibilité actuelle des détecteurs et la trentaine d'alertes déjà engrangées, nous allons pouvoir approfondir notre connaissance des trous noirs et tester la théorie de la relativité générale d'Einstein sur ces objets hyperdenses. Nous détecterons des fusions d'étoiles à neutrons, ce qui apportera aussi des renseignements sur la structure interne de ces astres énigmatiques. En revanche, on ne pourra observer la chute de trous noirs dans des trous noirs supermassifs qu'avec un immense interféromètre de plusieurs millions de kilomètres de long. Ce sera fait avec les satellites Lisa en 2034… voire avant si les Chinois s'y mettent ces prochaines années.

Pourra-t-on un jour détecter les ondes qui se sont formées lors de l'événement le plus énergétique qui soit, le Big Bang?
Les ondes gravitationnelles émises alors sont très faibles, puisqu'elles ne représentent que le dix mille milliardième de la densité de l'Univers. Virgo et Ligo ne pourront les détecter. De plus, on sait maintenant que les coalescences de trous noirs sont nombreuses. Elles créent une mer d'ondes gravitationnelles qui cache le fond du Big Bang… Je suis donc pessimiste.

En une milliseconde, ils émettent autant d'énergie que le Soleil en un jour. Depuis plus de dix ans, les sursauts radio rapides intriguent les chercheurs, qui ignorent toujours à quels phénomènes ils sont dus.

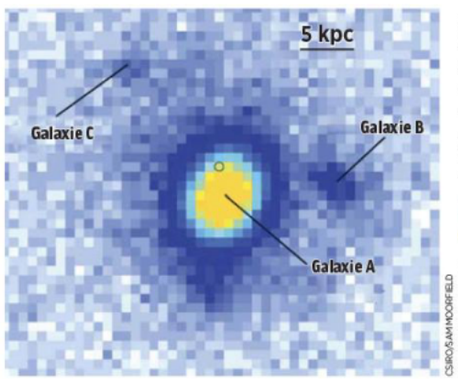
Ces mystérieux flashs venus des confins de l'espace

C'est l'un des mystères les plus excitants de ces dernières années. Une des surprises que l'Univers nous réserve encore ! », s'enflamme Jocelyn Bell. Et en matière de trouvailles cosmiques, l'astrophysicienne britannique s'y connaît ! En 1967, c'est elle qui a découvert les premiers pulsars, ces astres très compacts qui rayonnent tels des phares célestes. Mais aujourd'hui, c'est pour d'autres signaux venus des confins de l'espace qu'elle s'enthousiasme : d'énigmatiques flashs radio d'une intensité extrême, qui apparaissent et disparaissent dans le ciel en quelques millisecondes. Détectés en 2007, ils n'en finissent pas de défier l'imagination des astrophysiciens.

En quelques années, toute une communauté de radioastronomes s'est lancée sur leurs traces. L'une de ces scientifiques, Emily Petroff, de l'université d'Amsterdam (Pays-Bas), tient à jour le registre des sursauts détectés : *« Leur nombre a quasiment doublé en deux ans et atteint désormais la centaine, 2019 ayant été une année particulièrement féconde. »*

Pour comprendre l'effervescence qui règne autour de ces signaux, il faut revenir en 2007, lors de leur découverte. À l'époque, Duncan Lorimer, de l'université de Virginie-Occidentale (États-Unis), cherche à repérer des pulsars très brillants au sein de galaxies situées à 200 000 années-lumière de la Voie lactée, les Nuages de Magellan. Il confie à l'un de ses étudiants, David Narkevic, le soin de réexaminer tout un jeu de données enregistrées six ans plus tôt par le radiotélescope australien Parkes. *« David est venu me voir un jour avec le seul signal qu'il avait trouvé… et quel signal ! Il ne ressemblait à rien d'autre : il brillait cent fois plus que tous les autres signaux du ciel durant quelques millisecondes. Une surprise totale, car on pensait que les émissions les plus intenses avaient déjà été repérées. »*

Second motif d'étonnement : *« Même si nous ne pouvions localiser la source de l'émission avec précision, sa forme nous indiquait qu'elle avait voyagé quelques milliards d'années-lumière »*, raconte Duncan Lorimer. Il réalise alors qu'il a sous les yeux la manifestation d'un phénomène cosmique inconnu, venant de l'Univers très lointain…



CSIRO/SAM MOORFIELD

FRB 180924 est le premier sursaut radio rapide unique à avoir été localisé avec précision, dans une galaxie peu active à 3,6 milliards d'années-lumière de la Terre. Il a été repéré en 2018 par trois télescopes, d'abord Askap en Australie, puis Keck à Hawaii et le VLT au Chili.

Des interférences dues à… un four à micro-ondes

Cependant, « le sursaut de Lorimer », ainsi qu'on le nommera par la suite, reste une curiosité inexpliquée pendant plusieurs années. Certains doutent même de la réalité du phénomène, d'autant que des interférences dues… à un four à micro-ondes ont jeté un discrédit sur les mesures. Mais en 2013, toujours grâce au télescope Parkes, Dan Thornton, de l'université de Manchester (Royaume-Uni), détecte quatre nouveaux sursauts rappelant étrangement celui de Lorimer. Ils présentent une même particularité : les basses fréquences du signal arrivent bien après les hautes fréquences. Ce fort décalage indique une origine très lointaine. Et implique une énergie colossale pour que le signal arrive jusqu'à nous. *« En un millième de seconde, c'est au moins la quantité d'énergie émise par le Soleil en un jour qui est relâchée »*, explique Emily Petroff. Les résultats montrent en outre que ces flashs peuvent se manifester n'importe où dans le ciel. Les astrophysiciens estiment qu'il en surviendrait un chaque minute quelque part dans l'Univers ! Cette fois, les doutes s'estompent. Il s'agit bien d'un nouveau type de phénomène cosmique, que Dan Thornton nomme Fast Radio Burst. Les FRB, sursauts radio rapides, sont nés.

Dès lors, la communauté des astronomes s'enflamme. Tous les radiotélescopes capables de traquer les FRB sont mis à contribution. Parkes en Australie bien sûr, mais aussi Arecibo à Porto Rico ou le Green Bank Telescope aux États-Unis. On se penche également sur la question de leur origine. Les théories sont vite plus nombreuses que le nombre de sursauts observés ! Évaporation de trous noirs, effondrement cataclysmique d'étoiles supermassives… Mais aussi fusion d'étoiles à neutrons, ou collision de ce même type d'étoiles avec un autre objet cosmique : ces astres sont au centre de bon nombre de scénarios. *« Comme le signal est très court, il ne peut venir que d'un petit objet*, explique Duncan Lorimer. *Les étoiles à neutrons, à cause de leur rotation très rapide et de leur champ magnétique très puissant, sont de véritables réservoirs d'énergie, ce qui en fait d'excellents candidats pour générer les FRB. »* Mais dans ce cas, faut-il incriminer les plus jeunes, ou magnétars, très rapides et très magnétiques, ou de plus anciennes qui interagiraient avec un environnement turbulent ou un autre astre ? Tous les scénarios sont plausibles, et impossibles à départager tant qu'on ne sait pas précisément d'où viennent ces sursauts, uniques et furtifs, et par conséquent très difficiles à localiser.

Mais voici qu'en 2016, une autre découverte vient rebattre les cartes. *« Le tout premier répétiteur ! »*, s'exclame Victoria Kaspi, directrice du McGill Space Institute à l'université McGill au Canada. La chercheuse mène à l'époque un programme d'observations au télescope Arecibo. Avec ses collègues, elle suit en 2015 une source ayant émis un flash le 11 février 2012 – d'où son nom de code, FRB 121102 – quand l'équipe enregistre dix nouveaux sursauts, dont six en seulement dix minutes. Elle tient là un nouveau spécimen de FRB, localisable grâce aux nombreux ●●●

DANIEL JOHNREARDON / CC

Le radiotélescope Parkes, en Australie, a été le premier à enregistrer les mystérieuses bouffées radio, au début des années 2000.

COURTESY DUNCAN LORIMER

« Quel signal ! Durant quelques millisecondes, il a brillé cent fois plus que tous les autres signaux du ciel »

Duncan Lorimer, professeur d'astronomie à l'université de Virginie-Occidentale

J. ORIENDI/GETTY IMAGES

L'observatoire d'Arecibo, à Porto Rico, fait partie d'un réseau mondial de télescopes capables de traquer les mystérieux FRB.

●●● flashs : la source se situe à 2,5 milliards d'années-lumière de la Terre.

Cette avancée force les astrophysiciens à changer de perspective. Un sursaut ne peut en effet se répéter que si le phénomène qui le produit perdure. Alors, *exit* les scénarios cataclysmiques qui signent la mort d'un astre ? Oui… sauf s'il existe deux types de FRB : les uns uniques, les autres répétitifs. Faut-il envisager deux mécanismes ? Et s'il ne s'agit que d'un seul et même phénomène, pourquoi n'observe-t-on pas davantage de répétiteurs ? Les discussions vont bon train.

Une source située à 3,6 milliards d'années-lumière

Les progrès des instruments d'observation pourraient-ils contribuer à dissiper le mystère ? La radioastronomie est alors en plein renouveau : les réseaux d'antennes combinant des milliers de signaux – les interféromètres – offrent de nouvelles possibilités. Victoria Kaspi le comprend très vite : *« À peu près à la même époque, mes collègues canadiens travaillaient à la construction d'un nouveau type de radiotélescope, Chime, près de Penticton, au Canada, dédié à l'étude des tout débuts de l'Univers. J'ai réalisé qu'il pourrait également détecter des FRB, à condition que l'on revoie sa conception… et pour quelques millions de dollars de plus. »* Depuis 2017, Chime, doté de quatre antennes semi-cylindriques alignées sur 400 mètres, balaie chaque jour tout le ciel septentrional. Grâce à ce dispositif et ses plus de mille capteurs, son champ de vision est 100 à 200 fois plus grand que celui des paraboles classiques.

Les résultats ne se font pas attendre. En janvier 2019, l'équipe annonce non seulement treize nouveaux sursauts, mais aussi un deuxième répétiteur : FRB 180814, qui a émis six flashs entre août et octobre 2018. En août 2019, c'est la publication de huit répétiteurs supplémentaires ! Les astrophysiciens canadiens déclarent en outre avoir détecté des centaines de sursauts uniques. Mais Chime ne permet pas encore de les localiser avec précision.

De l'autre côté du globe, en Australie, l'interféromètre Askap s'est lui aussi lancé, en 2017, dans la chasse aux FRB. Il a déjà repéré une trentaine de sursauts dont un nouveau répétiteur, lui aussi annoncé en août 2019. En tout, plus d'une dizaine de radiotélescopes traquent désormais les FRB. C'est à Askap que l'on doit un autre exploit, la première localisation précise d'un sursaut unique ! Sa source se situe à 3,6 milliards d'années-lumière, au bord d'une grande galaxie spirale. Contrairement au répétiteur FRB 121102, niché dans une zone très active, celui-ci – FRB 180924 – vient d'un environnement bien plus calme et peu propice aux jeunes étoiles à neutrons. Ce qui pourrait accréditer l'hypothèse de l'existence de deux types de FRB. D'autant que, selon Victoria Kaspi, les répétiteurs vus par Chime semblent partager des caractéristiques différentes de celles des sursauts uniques.

Pour trancher, il faudrait pouvoir localiser l'ensemble des sursauts. *« Nous n'en sommes qu'au début »*, argue Duncan Lorimer. Le chercheur parie sur des milliers de détections pour 2025, et qu'à l'horizon 2030, ces sursauts serviront de sonde pour scruter l'univers lointain ! À suivre… ■

HÉLÈNE LE MEUR

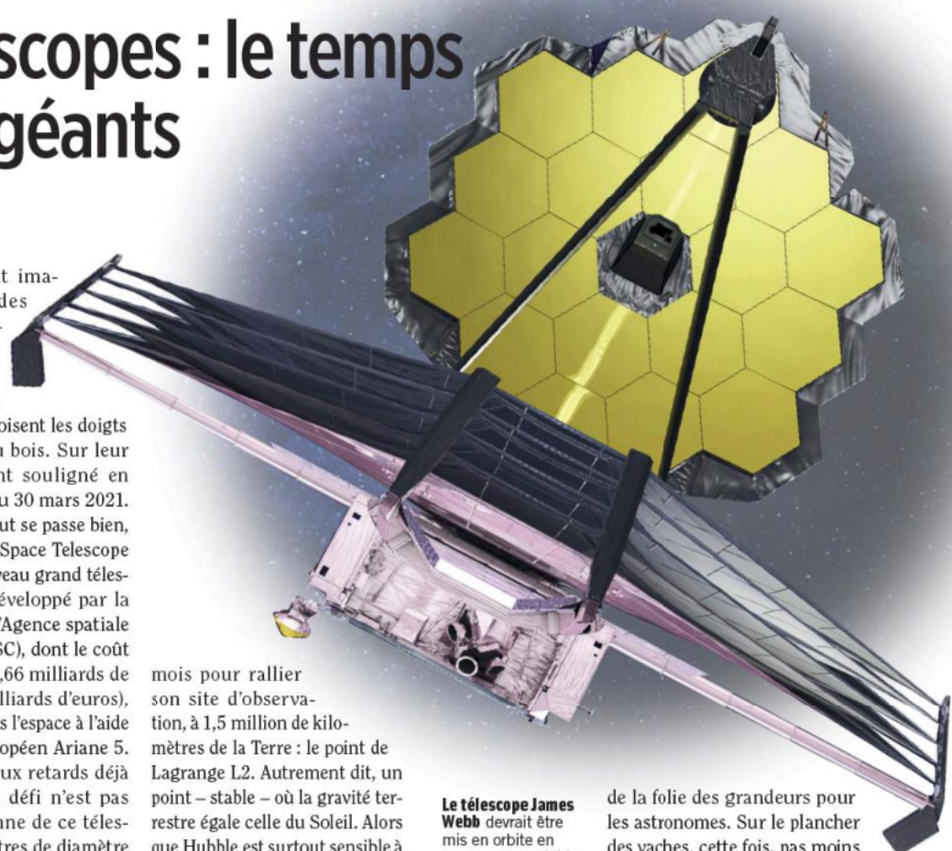
Video *Are We Alone? Emily Petroff at The Dish* **(en anglais) :** https://www.youtube.com/ watch?v=YGc-KTHMfmQ

Une video sur le radiotélescope Chime, (en anglais) : https://www.youtube.com/watch?v=iaqUI3I3y_Q

Une conférence de Victoria Kaspi (en anglais) : https://www.youtube.com/ watch?v=EIPWBA7kCEc

James Webb Space Telescope, ELT, GMT, TMT… Ces mastodontes de l'observation entreront en service dès les prochaines années. À la clef, des découvertes sur les premières étoiles, le trou noir central de la Galaxie ou l'atmosphère des exoplanètes.

Télescopes : le temps des géants



NASA / JAMES WEBB SPACE TELESCOPE

Le télescope James Webb devrait être mis en orbite en 2021. Sa sensibilité sera cent fois supérieure à celle du télescope Hubble, gage d'étonnantes découvertes.

Comment imaginer des ingénieurs du spatial superstitieux ? Et pourtant, ils croisent les doigts et touchent du bois. Sur leur agenda, ils ont souligné en rouge la date du 30 mars 2021. Ce jour-là, si tout se passe bien, le James Webb Space Telescope (JWST), le nouveau grand télescope spatial développé par la Nasa, l'Esa et l'Agence spatiale canadienne (ASC), dont le coût a dépassé les 9,66 milliards de dollars (8,8 milliards d'euros), sera envoyé dans l'espace à l'aide du lanceur européen Ariane 5. Vu les nombreux retards déjà accumulés, le défi n'est pas gagné ! L'antenne de ce télescope de 6,5 mètres de diamètre (trois fois plus grande que celle de Hubble) est un assemblage de 18 segments, repliés dans la coiffe d'Ariane. Son déploiement dans l'espace est une gageure inédite. L'instrument mettra trois mois pour rallier son site d'observation, à 1,5 million de kilomètres de la Terre : le point de Lagrange L2. Autrement dit, un point – stable – où la gravité terrestre égale celle du Soleil. Alors que Hubble est surtout sensible à la lumière visible, le James Webb aura pour cible privilégiée les astres froids qui rayonnent dans le proche infrarouge.

La décennie qui commence est décidément placée sous le signe de la folie des grandeurs pour les astronomes. Sur le plancher des vaches, cette fois, pas moins de trois télescopes géants vont voir le jour… ou plutôt la nuit. Ils seront équipés de miroirs de plus de 20 mètres de diamètre, deux fois plus grands que ceux actuellement en service. Record en vue pour l'Extremely Large Telescope (ELT) construit par l'Observatoire européen austral (Eso) sur le Cerro Armazones au Chili : 39,3 mètres de diamètre. Avec son miroir de 24,5 mètres, le Giant Magellan Telescope (GMT) ●●●

COURTESY BENOÎT NEICHEL

« En une nuit d'observation, l'ELT pourra capter plus de photons que l'ensemble des plus grands téléscopes du monde »

Benoît Neichel, laboratoire d'astrophysique de l'université d'Aix-Marseille

COURTESY CHRISTOPHE DUMAS

« On peut imaginer observer les mêmes objets avec des instruments propres à chacun des télescopes »

Christophe Dumas, responsable scientifique du projet TMT

●●● rejoindra les deux télescopes Magellan (6,5 mètres) installés sur le site de Las Campanas, lui aussi au Chili. Il est financé par des universités américaines, ainsi que par des fonds australiens, brésiliens, sud-coréens et chiliens. Le troisième projet concerne, lui, l'hémisphère Nord. C'est le Thirty Meters Telescope (TMT), développé sous la direction de l'université de Californie avec le Canada, la Chine, l'Inde et le Japon. Comme son nom l'indique, son miroir principal atteindra les 30 mètres. Il devrait trouver sa place au pied du Mauna Kea, à Hawaii… si la direction américaine ne jette pas l'éponge face à l'hostilité d'une partie de la population *(lire l'encadré p. 53)*. Les travaux sont à l'arrêt depuis 2015 ; un site de remplacement est même envisagé : le Roque de los Muchachos sur l'île de La Palma, dans l'archipel des Canaries. Pour l'instant, *« la mise en fonction du TMT est toujours fixée à 2027 à Hawaii, mais le temps presse pour tenir cette date »*, prévient Christophe Dumas, responsable des opérations.

Installés en altitude, là où l'air contient moins de vapeur d'eau

Comme l'ELT, le TMT est constitué d'un assemblage de centaines de miroirs de 1,4 mètre de diamètre (798 pour l'ELT, 492 pour le TMT), alors que pour le GMT, il s'agit d'une combinaison de 7 miroirs de 8,4 mètres. Ce sont des mastodontes de plusieurs milliers de tonnes – 3400 tonnes pour l'ELT ! – dont la capacité à récolter la lumière des astres sera multipliée par dix par rapport aux grands télescopes actuels. *« En une nuit d'observation, l'ELT pourra capter plus de photons que l'ensemble des plus grands télescopes du monde »*, appuie Benoît Neichel, du laboratoire d'astrophysique de l'université d'Aix-Marseille, co-responsable d'un des instruments de l'ELT. Comme les autres grands télescopes déjà en service dans le monde, les trois projets au sol seront installés en altitude, là où l'air contient moins de vapeur d'eau. En effet, celle-ci absorbe certaines longueurs d'onde infrarouges et empêche de les détecter. Installé à 4 050 mètres d'altitude, le TMT, tel qu'il est actuellement envisagé à Hawaii, sera moins affecté que l'ELT (3 046 m) et le GMT (2 516 m). Quelle que soit l'altitude, l'atmosphère étant turbulente, ils seront tous trois équipés d'optique adaptative, un système qui permet de corriger quasiment en temps réel les petites déformations de l'image dues à la perturbation atmosphérique : il sonde plusieurs fois par seconde l'atmosphère au moyen de rayons laser et « déforme » légèrement les miroirs grâce à des vérins placés en dessous. Les grands télescopes actuels en sont déjà équipés.

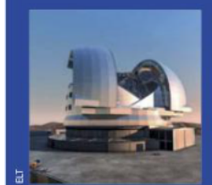
Esprit collaboratif et observations conjointes

Ces quatre projets pharaoniques atteignent des coûts… stratosphériques. Plus d'un milliard d'euros ! Et si tous les budgets semblent bouclés, la première version des futurs télescopes risque fort de ne ressembler que de loin au projet définitif. Ainsi, en 2029, seuls quatre des sept miroirs du GMT seront assemblés.

La concurrence est exacerbée entre les équipes des quatre projets qui ambitionnent de sonder les astres faibles des confins de l'Univers, car le premier instrument à entrer en service devrait découvrir des phénomènes nouveaux. *« À condition qu'il soit vraiment opérationnel,* prévient Bertrand Koehler de l'Eso, conseiller du projet ELT. *Souvenons-nous que le télescope soviétique de 6 mètres de Zelentchouk fut le premier de sa classe en 1975, mais qu'il n'a rien produit de notable à cause de son optique défaillante. »* Au sol, l'ELT mène la course en tête puisqu'il devrait voir sa « première lumière » en 2025, quatre ans avant le GMT, que précédera certainement le TMT. Mais les travaux se déroulent dans un esprit collaboratif. À chaque revue de projet, des membres des équipes « concurrentes » sont invités à donner leur avis. Et, depuis dix ans, les ingénieurs et les scientifiques des quatre équipements se réunissent tous les deux ans pour partager, lors de colloques, leurs avancées ou leurs problèmes. Il faut dire qu'il est prévu des observations conjointes. *« On peut imaginer observer les mêmes objets avec des instruments propres à chacun des télescopes. Ce qui permettrait d'effectuer l'étude d'un même phénomène sur plusieurs longueurs d'onde »*, se réjouit Christophe Dumas. De plus, la collaboration entre le TMT et le GMT permettra une couverture totale du ciel pour les Américains, avec 25 % du temps d'observation.

Toutefois, les différents télescopes étant équipés du même type d'instruments généralistes, les résultats risquent de s'avérer assez semblables. *« Ce sont les instruments de deuxième génération qui, par la suite, seront spécialisés,* indique Benoît Neichel. *La stratégie diffère entre les TMT et GMT, qui plaident pour des instruments capables d'obtenir des images des exoplanètes, alors que l'ELT investira plutôt l'Univers lointain. »* Le JWST pointera le premier les champs stellaires, les grands télescopes au sol prenant le relais pour affiner les détails… et les études. L'astronomie est plus que jamais une aventure collective ! ■ **JACQUES-OLIVIER BARUCH**

Les quatre futurs colosses



ELT

ELT

Miroir : 39,3 m de Ø et 1116 m² de surface
Coût estimé : 1,174 milliard d'euros
Localisation : Cerro Armazones (Chili)
Propriétaire : European South Observatory
Mise en service : fin 2025
Missions : détection d'exoplanètes dans la zone habitable, étude des premières galaxies et du trou noir central de la Voie lactée.

GMT

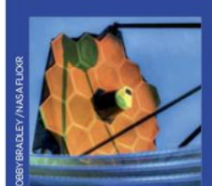
GMT

Miroir : 24,5 m de Ø et 368 m² de surface
Coût estimé : 0,9 milliard d'euros
Localisation : Las Campanas (Chili)
Propriétaires : États-Unis, Australie, Brésil, Corée du Sud
Mise en service : 2029
Missions : étude détaillée des premières étoiles et galaxies, des exoplanètes, analyse des trous noirs.

TMT

TMT

Miroir : 30 m de Ø et 655 m² de surface
Coût estimé : 1,4 milliard d'euros
Localisation : Mauna Kea (Hawaii)
Propriétaires : université de Californie, Canada, Japon, Chine, Inde
Mise en service : 2028
Missions : étude détaillée des premières étoiles et galaxies et des exoplanètes.



BOBBY BRADLEY / NASA FLOOR

James Webb

Miroir : 6,5 m de Ø et 25 m² de surface
Coût estimé : 8,8 milliards d'euros
Localisation : 1,5 million de km de la Terre
Propriétaires : Nasa, Esa, CSA (Canada)
Lancement prévu : mars 2021
Missions : détection des premières étoiles et galaxies, des atmosphères d'exoplanètes et observation de la naissance des étoiles.

Le site de la participation française au James Webb Space Telescope
www.jwst.fr

Interview de Pierre-Olivier Lagage, du CEA, sur les futurs grands télescopes:
https://www.franceculture.fr/emissions/la-methode-scientifique/telescopes-geants-toujours-plus-grands-toujours-plus-loin

GABRIELE HOLTERMANN-GORDEN/SPA

Manifestation à New York, le 19 juillet dernier, contre la construction du TMT à Hawaii. Cet équipement doit être édifié au pied du Mauna Kea, une montagne sacrée pour la population locale, dans un environnement déjà fragile.

Les Polynésiens défendent leur paradis

Au pied du Mauna Kea, dans l'archipel hawaïen, rien ne va plus entre les astronomes et les autochtones. Depuis juillet dernier, près d'un millier de manifestants s'opposent pacifiquement à la reprise des travaux de construction du Thirty Meters Telescope (TMT), arguant du caractère sacré de leur montagne – l'une des portes du paradis polynésien – où sont inhumés certains ancêtres. À l'abri de toute pollution lumineuse, le site – qui abrite déjà treize télescopes – constitue l'eldorado des astronomes. Pour autant, la population locale n'a-t-elle pas son mot à dire sur l'implantation d'un si colossal équipement?

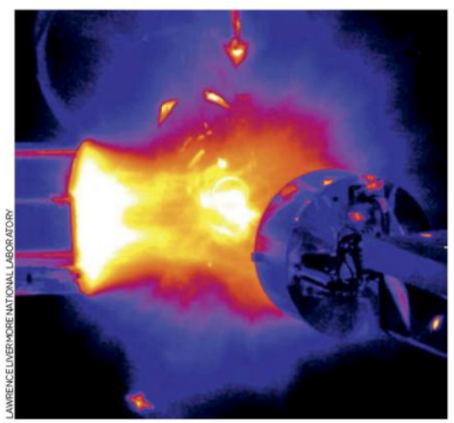
Ce n'est pas la première fois qu'un tel cas se produit au Mauna Kea, puisqu'en 2006, sous les protestations polynésiennes, l'université d'Hawaii avait dû arrêter la construction des télescopes qui devaient être adjoints au grand télescope Keck. Depuis l'invasion de l'archipel par James Cook (1778) et le renversement du royaume (1893) par des hommes d'affaires américains, puis son intégration aux États-Unis par la force, les Hawaiiens de souche se sentent délaissés ; ils ne sont pas consultés et ne profitent pas des millions de dollars déversés par la communauté scientifique internationale. *« Ils tentent de reconquérir leur identité et de faire revivre leurs traditions, leur culture et leur langage,* analyse Julien Lozi, astronome au télescope japonais Subaru, en activité sur le Maunea Kea. *À cause de ces problèmes passés, le TMT se retrouve au milieu d'un conflit qui dépasse la seule construction du télescope. »* Les astronomes devront-ils se résoudre à trouver un autre paradis… du côté des Canaries ?

Comment mieux comprendre certains objets inaccessibles, comme une étoile en formation ou une supernova ? En recréant, en laboratoire et à l'aide d'instruments d'une puissance inouïe, les conditions dantesques règnant à l'échelle du Cosmos.

On a créé une étoile !

78 000 ans, c'est le temps qu'il faudrait à une sonde comme New Horizons, premier vaisseau spatial à avoir visité Pluton, pour rallier Proxima du Centaure, l'étoile la plus proche, à seulement 4,2 années-lumière de nous. En l'état actuel des technologies, les phénomènes ayant lieu au cœur des étoiles nous sont donc inaccessibles… À moins de recréer, sur Terre, des astres modèle réduit, partant du principe que les lois de la physique sont universelles.

C'est le défi relevé notamment par une équipe américaine menée par Maria Gatu Johnson, du Centre des sciences du plasma et de la fusion du MIT, aux États-Unis. Les physiciens viennent en effet de donner naissance à une étoile miniature au sein de la National Ignition Facility (NIF) de Livermore, en Californie. Cette installation abrite 192 faisceaux laser parmi les plus puissants du monde – jusqu'à 500 térawatts (10^{12} watts) – dont les rayons, après un parcours d'un millième de seconde dans un bâtiment long comme trois terrains de football, viennent frapper une cible minuscule au centre d'une chambre d'expériences de 10 mètres de diamètre. Comme « *viser une fourmi au milieu d'un autobus* », selon les mots des chercheurs ! La cible en question était constituée de microcapsules plus fines qu'un cheveu, emplies d'hélium 3. En implosant sous la pression – dix fois supérieure à celle de l'atmosphère – exercée par les lasers, celles-ci ont créé un plasma suffisamment dense et chaud pour qu'y soient reproduites, pour la première fois, les réactions de fusion qui s'enclenchent au cœur des étoiles.


LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORY

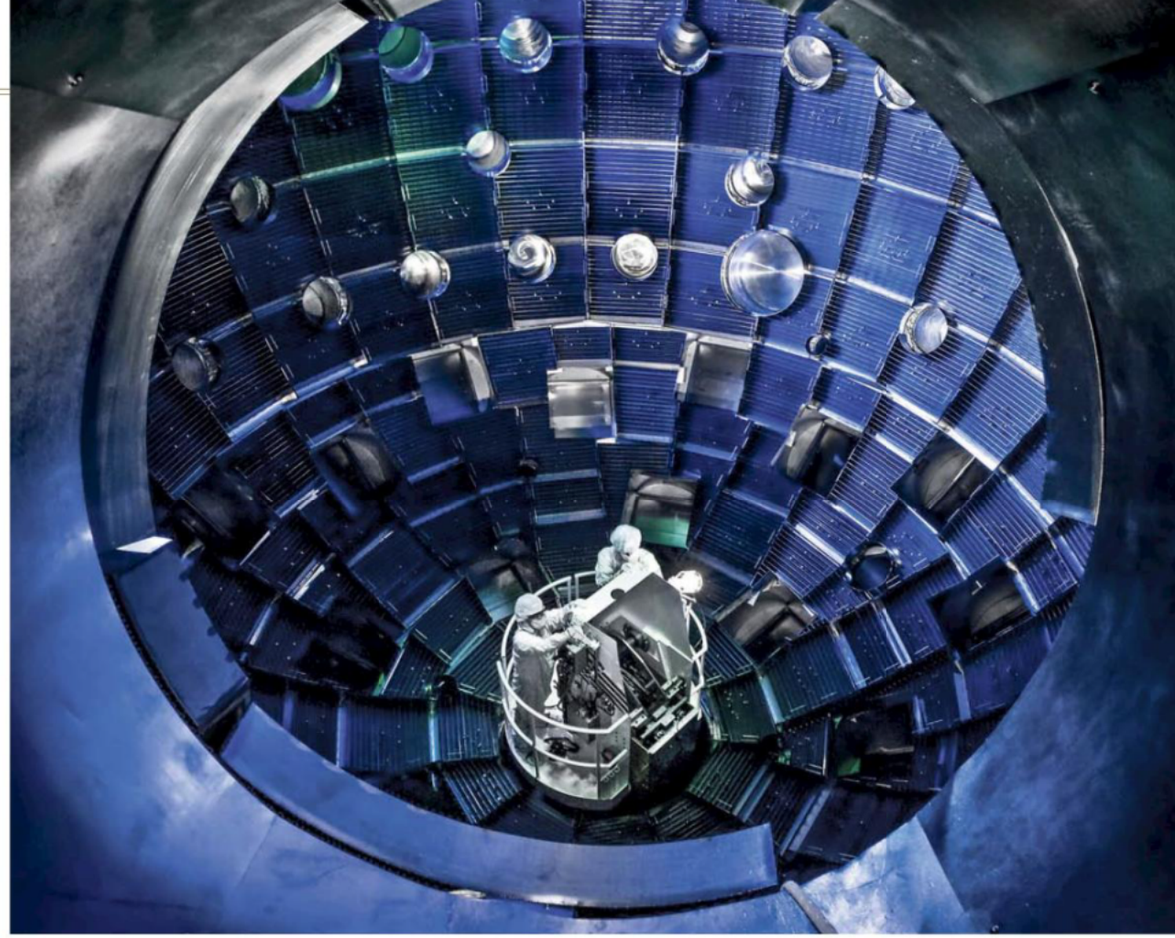
Les 192 lasers très puissants du National Ignition Facility de Livermore, en Californie, ont permis de reproduire – au centre – les conditions de température et de densité extrêmes qui règnent au cœur d'une étoile, en bombardant des cibles emplies d'hélium 3 avec une énergie de 500 térawatts.

La fusion est l'un des moyens de synthétiser des noyaux atomiques – les autres étant la capture de neutrons ou de protons et la fission –, ce que l'on nomme la nucléosynthèse. En fusionnant, deux atomes donnent naissance à un atome plus lourd. C'est ainsi que les fours stellaires transforment l'hydrogène en hélium puis, à partir de l'hélium, fabriquent d'autres noyaux légers comme le carbone et l'oxygène, produisant dans le même temps une quantité phénoménale d'énergie qui les font briller. À la fin de leur existence, les étoiles forgent des éléments de plus en plus lourds, qui sont dispersés dans l'espace lorsqu'elles explosent. À Livermore, de nouvelles expériences programmées pour février 2020 testeront les réactions de fusion d'autres éléments que l'hélium.

Un infime point d'énergie pour reproduire les conditions du Big Bang

Aujourd'hui, de nombreux laboratoires usent de lasers de puissance pour tenter de reproduire les processus physiques qui régentent la vie d'une étoile. C'est le cas de l'Institut national roumain de physique et d'ingénierie nucléaire Horia Hulubei, qui dispose du laser le plus puissant au monde, avec une impulsion record de 10 pétawatts (10^{15} watts) atteinte le 7 mars 2019. Développé par l'industriel français Thales dans le cadre du programme de recherche européen ELI-NP (Extreme Light Infrastructure for Nuclear Physics), cet instrument doit initier un infime point d'énergie afin de recréer les conditions existant au moment du Big Bang. Le même programme européen a permis à la France de se doter, à Saclay, de l'instrument Apollon, dont le faisceau lumineux et le champ électrique correspondant devraient à terme atteindre également 10 pétawatts. Installé sur 4 000 mètres carrés au sein du Centre interdisciplinaire lumière extrême (Cilex), le faisceau ultra-puissant sera concentré sur une cible infime pendant une durée de l'ordre de la dizaine de femtosecondes (10 millionièmes de milliardième de seconde). Soit une intensité lumineuse telle qu'elle produira des bouquets de particules, de rayons X ou de rayons gamma dans les conditions de pression et de température extrêmes des supernovæ, pulsars et autres sursauts gamma… La France dispose également depuis 2014 du Laser mégajoule (LMJ) au Barp, en Aquitaine. Comme le NIF, il est conçu et utilisé pour étudier en laboratoire et à une échelle millimétrique le fonctionnement des armes nucléaires. Il ne dispose aujourd'hui que de 64 faisceaux sur les 176 prévus. Mais depuis fin 2017, 20 à 30 % de son temps de fonctionnement est réservé à la communauté scientifique internationale grâce au faisceau Petal (Petawatt Aquitaine Laser). Celui-ci permet d'atteindre une intensité de plusieurs pétawatts durant 0,5 à 10 picosecondes (10^{-12} seconde), afin de reproduire les états de la matière au cœur des planètes ou des étoiles, ou la génération de champs magnétiques intenses lors d'explosions de supernovæ.

Si les militaires et les scientifiques se retrouvent ainsi autour des mêmes équipements, il leur arrive aussi de mettre au point ensemble des expériences aux objectifs similaires. Il en ●●●

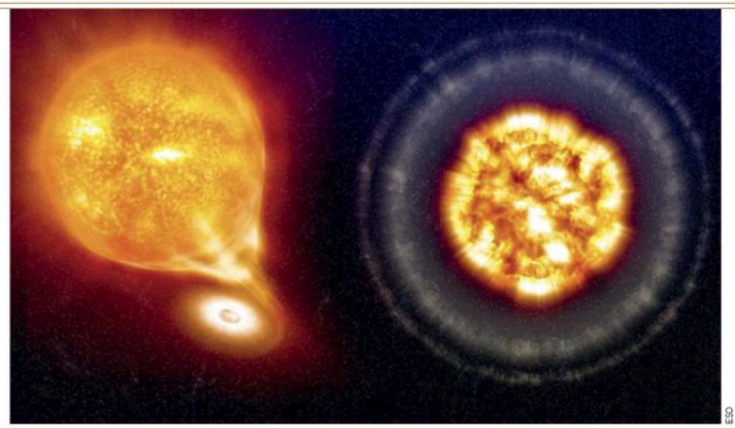

LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORY

Au centre de la chambre d'expérience (ici en maintenance) du National Ignition Facility, des faisceaux laser convergent à la vitesse de la lumière et avec une précision inférieure au diamètre d'un cheveu.

KAREEM AHMED / UCF

« L'instrument produit une turbulence gazeuse intense et une flamme très rapide. Ce qui simule les conditions d'une supernova »

Kareem Ahmed, chercheur en génie mécanique et aérospatial à l'université de Floride



ESO

Le processus qui a abouti à la supernova SN2006X : une naine blanche (en bas à gauche) arrache par gravitation de la matière à son compagnon, ce qui augmente sa masse. Jusqu'à ce que des réactions de fusion s'emballent en son sein et qu'elle explose (à droite).

●●● est ainsi pour un résultat paru en novembre dernier dans *Science*, qui relate des travaux de scientifiques américains – au service notamment de laboratoires de recherche de la Navy et de l'US Air Force –, destinés à améliorer la propulsion hypersonique de missiles, avions et autres vaisseaux spatiaux, et plus spécialement d'engins équipés de moteurs à détonation. *« Un travail qui a abouti à une découverte concernant les supernovæ »*, se réjouit Kareem Ahmed, chercheur en génie mécanique et aérospatial à l'université de Floride, l'un des principaux auteurs de la publication. Plus précisément la fin de vie de certaines d'entre elles, dites de type Ia ou thermonucléaires, qui connaissent, elles aussi, un épisode de détonation au moment de leur explosion.

Ce type de supernova n'existe qu'au sein de couples d'étoiles comprenant une naine blanche, astre qui se forme en fin de vie des étoiles de masse moyenne, lorsque celles-ci ont fusionné tout leur hydrogène en hélium et s'effondrent sur elles-mêmes sous l'effet de la gravité. Leur densité est alors d'environ une tonne par centimètre cube. Si leur compagnon est suffisamment proche, leur champ gravitationnel lui arrache de la matière, qui augmente d'autant leur masse. Passé une certaine limite, dite de Chandrasekhar, des réactions de fusion s'amorcent et s'emballent en leur sein, jusqu'à ce que la moitié de l'étoile soit transformée en nickel et que son noyau atteigne une densité d'environ 1 000 tonnes par centimètre cube.

Telle une bombe thermonucléaire, la naine blanche explose alors en supernova, propageant une bouffée d'énergie équivalente à celle émise par l'étoile durant toute sa vie. Couche après couche, elle se désintègre tout entière en quelques instants, ensemençant l'espace de ses éléments lourds, tandis que l'onde de choc produite compresse les nuages moléculaires voisins et engendre une flambée de naissances stellaires.

Ce phénomène est longtemps demeuré mystérieux. Quel processus déclenchait la transition entre l'emballement nucléaire – la déflagration – et la détonation finale ? Les déflagrations, ou flammes, relativement lentes, se propagent, par transfert d'énergie thermique, à une vitesse inférieure à celle du son. Les détonations se déplacent, elles, à une vitesse supersonique sous l'effet de l'onde de compression résultant du choc. Le mécanisme théorique de cette transition déflagration-détonation a été établi en 2008 par Alexei Poludnenko, de l'université du Connecticut, auteur également de la publication. *« Nous l'avons découvert dans le contexte des flammes chimiques sur Terre, considérablement plus faciles à étudier »*, précise-t-il.

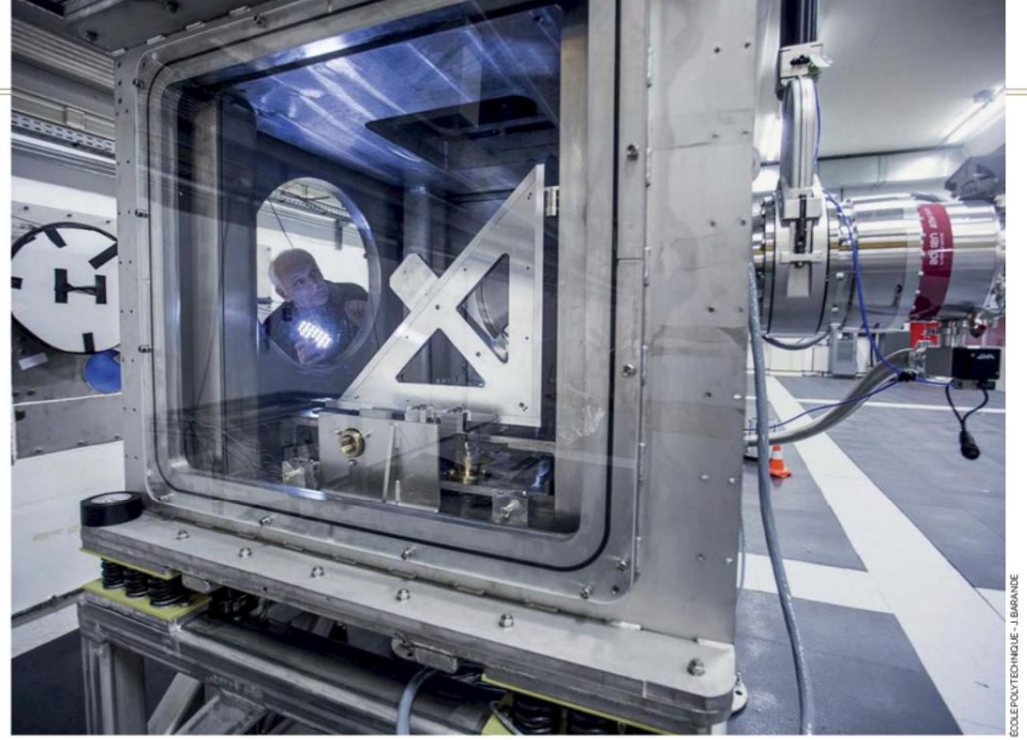
Les recherches effectuées par l'équipe ont nécessité le développement *« d'un instrument expérimental unique*, reprend Kareem Ahmed, *le "Turbulent Shock Tube" (tube à chocs turbulents), qui génère un choc ultra-rapide afin de produire une turbulence gazeuse intense et une flamme très rapide. Ce qui simule les conditions d'une supernova »*. Mesurées et enregistrées à l'aide de lasers et de caméras, ces expériences ont ensuite été analysées numériquement par les supercalculateurs militaires. Leurs résultats ont permis de comprendre comment, lorsqu'est atteint un seuil de turbulence créé par une flamme dans un environnement non confiné, celle-ci brûle toute l'énergie disponible, s'accélère et explose à une vitesse cinq fois plus rapide que la vitesse du son. Et d'élucider ainsi le mystère de la mort des supernovæ « de type Ia ».

Comment les poussières d'étoile deviennent germes de vie

En explosant, les supernovæ soufflent autour d'elles des flots de matière chaude et dense. Ces vents de molécules et de poussières se diluent dans le milieu interstellaire, s'agrègent et finissent par former de nouvelles étoiles et planètes. Mais quelle est la nature de ces flux de matière et le rôle de ces poussières dans l'élaboration de molécules plus complexes, ingrédients indispensables à l'émergence de la vie ?

Pour répondre à ces questions, une équipe de recherche franco-espagnole a mis au point la machine Stardust à l'Institut de science des matériaux de Madrid. Elle simule les conditions régnant dans les géantes rouges en s'inspirant de la chimie à l'œuvre dans les flammes d'hydrocarbure : des atomes de carbone et d'hydrogène moléculaire, mélangés dans des proportions similaires à celles des enveloppes des géantes rouges et chauffés à une température de plus de 700 °C, ont effectivement produit des échantillons de poussières stellaires. Mais surtout, l'expérience a permis de reconstituer les étapes de la formation des poussières : les atomes de la photosphère – la couche externe de l'étoile – évoluent en petites molécules, qui deviennent les germes de formation de grains de carbone. Il ne reste « plus » qu'à découvrir comment ces poussières d'étoiles deviennent un jour des germes de vie… *« Nous comprenons l'Univers et les processus qui s'y déroulent grâce à notre connaissance toujours croissante de la physique fondamentale*, conclut Alexei Poludnenko. *Une compréhension que valident les expériences sur Terre. »* ■

SYLVIE ROUAT



ÉCOLE POLYTECHNIQUE - J. BARANDE

L'installation Apollon, implantée à Saclay, sera opérationnelle en 2020. Elle fournira des impulsions laser inédites, très brèves et énergétiques, permettant d'ouvrir de nouveaux champs d'étude, notamment en astrophysique.

Une bonne soupe… primordiale

Recréer en laboratoire la formule originelle qui a fait éclore la vie terrestre, tel était l'ambition d'un jeune étudiant américain, Stanley Miller, en 1952. Il suivait alors les traces du biochimiste russe Alexander Oparin qui, dans les années 1920, avait émis l'hypothèse que l'atmosphère de la Terre primitive – avant la photosynthèse – était dénuée d'oxygène, donc non oxydante pour les premières molécules de la vie ; les protéines ou l'ADN étant rapidement dégradées par l'oxygène. Débarrassé intellectuellement de cet écueil scientifique, Stanley Miller définit trois ingrédients pour les conditions originelles : un mélange gazeux simulant l'atmosphère primitive, de l'eau chaude pour les océans et des étincelles électriques en guise d'impacts d'éclairs. Au bout d'une semaine de ce régime, il obtint une soupe primordiale contenant onze types différents d'acides aminés, les briques élémentaires de la vie terrestre ! Onze sur les vingt acides aminés de notre quotidien. Des recherches ultérieures ont montré que non seulement le jeune Miller avait bien retrouvé les vingt acides aminés connus, mais qu'il en avait créé cinq inusités sur Terre. Par la suite, l'expérience a été reproduite, en ajoutant par exemple du dioxyde de soufre, l'un des gaz émis lors des éruptions volcaniques, ce qui a permis de forger de nouveaux acides aminés… Reste à trouver comment ces ingrédients ont donné naissance à la première cellule.

UCSAN DIEGO LIBRARY

Stanley Miller dans son laboratoire en 1970.

Inspirations cosmiques

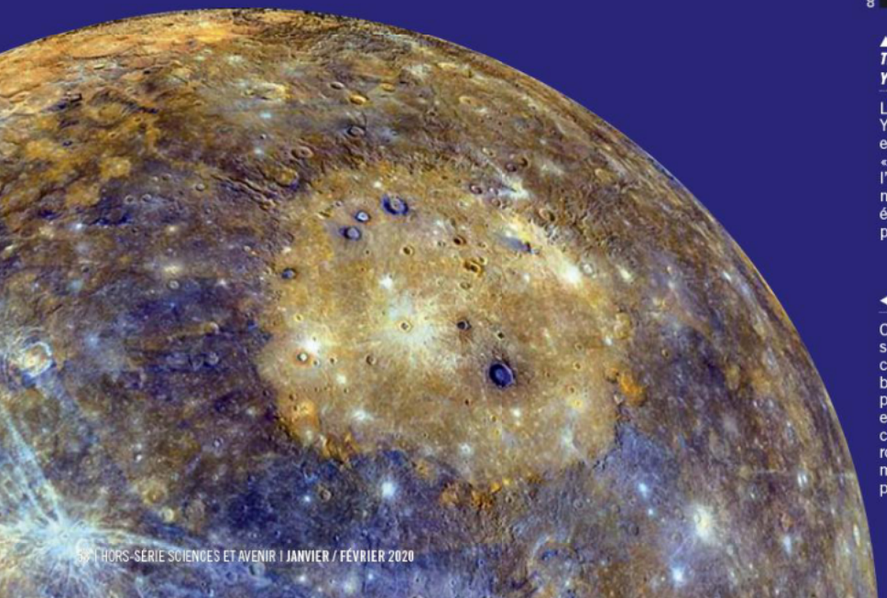
Depuis toujours, science et art produisent des représentations de l'Univers qui nourrissent notre imaginaire.

Une puissante, métaphysique source d'inspiration nourrit depuis des millénaires l'énergie créatrice des humains, rassemblés par-delà les civilisations dans la contemplation du ciel. Elle jaillit des profondeurs célestes, se propage en scintillements d'étoiles et filaments galactiques, poussières de comètes et arabesques de constellations. Face aux énigmes d'un Univers insondable, les artistes ont laissé libre cours à leur imagination, les scientifiques ayant pour leur part inventé et perfectionné tout un arsenal d'instruments d'observation. Ce désir commun de représenter le Cosmos peut prendre la forme d'un face-à-face inédit. Au témoignage visuel de découvertes cosmologiques inouïes répondent – jusqu'à ce que leurs identités parfois se confondent – les œuvres d'art. *Univers : explorer le monde astronomique**, l'ouvrage dont sont tirées les illustrations qui suivent, témoigne de ce dialogue tissé de comparaisons et de contrastes. Des clichés obtenus grâce aux télescopes, satellites ou ordinateurs, telle la rougeoyante simulation d'une tache solaire ou celui, frappant de proximité, de la surface de Mercure criblée de cratères colorés, côtoient une mosaïque dorée montrant Dieu plaçant le Soleil au sein du firmament, ou une peinture de la Voie lactée posée langoureusement sur un paysage lacustre. Mus par un même rêve, agités par les mêmes questionnements, art et science se rejoignent dans ces fulgurances esthétiques.

ANDREINA DE BEI

* *Univers : explorer le monde astronomique*, Phaïdon, 2017, 350 pages, 300 illustrations

NASA/JHUAPL



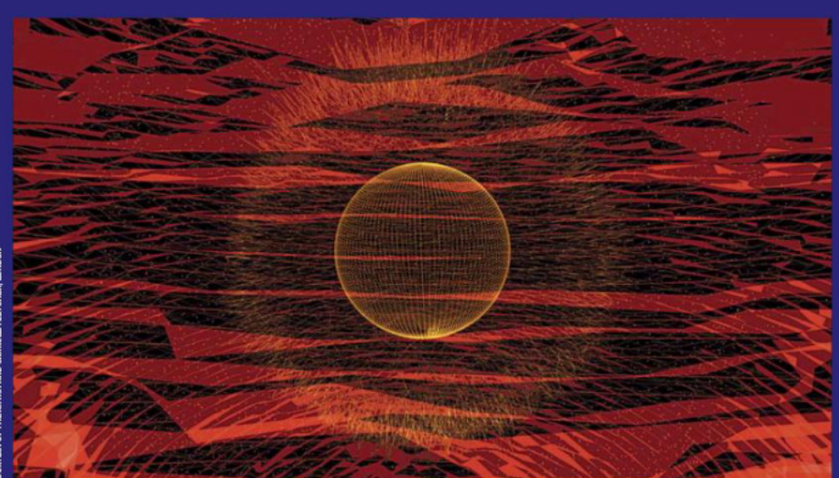
COURTESY ED. PHAIDON

▲ *Infinity Mirrored Room - The Souls of Millions of Light Years Away*, Yayoi Kusama, 2013

L'artiste japonaise Yayoi Kusama nous fait expérimenter, dans sa « pièce aux miroirs », l'infini du Cosmos et ses nuances lumineuses, évoquées dans l'installation par des LEDs étincelants.

◀ Le bassin Caloris

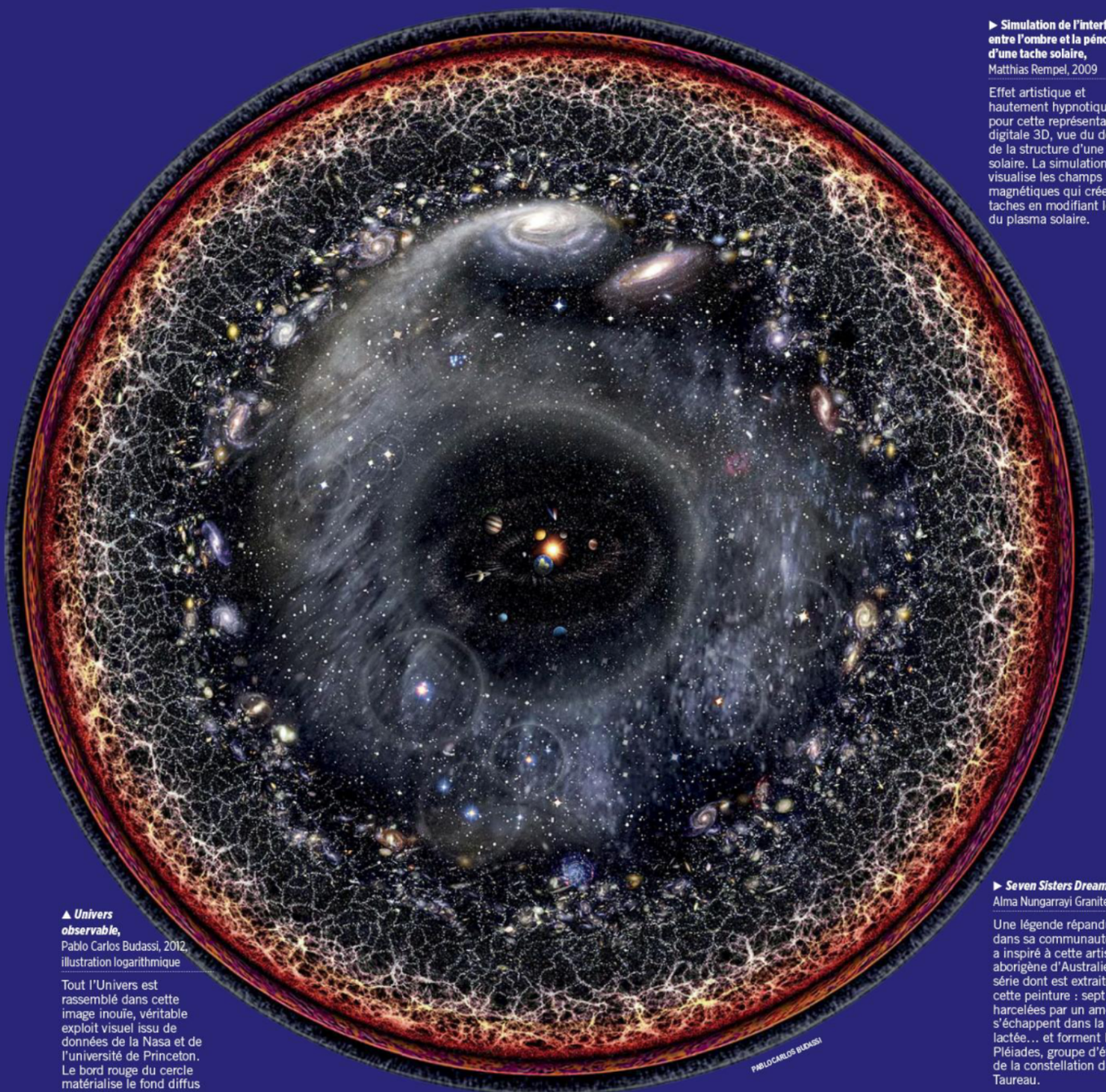
Cette image de Mercure, sur laquelle on distingue le cratère formé par l'immense bassin Caloris, a été captée par la sonde Messenger en 2008. Les différences chimiques et physiques des roches de la planète ont été mises en relief grâce à une palette de couleurs acidulées.



COURTESY OF THE ARTIST AND CARROLL/FLETCHER, LONDON

◀ *So What* 2012, film de Michael Joaquin Grey, 2005-2012

Voyager dans l'espace, jusqu'aux frontières du Système solaire, à une vitesse de plus en plus vertigineuse : c'est l'effet qu'a voulu obtenir l'auteur d'un film immersif, imaginé pour un dispositif d'écrans multiples, dont est tirée l'image ci-contre.



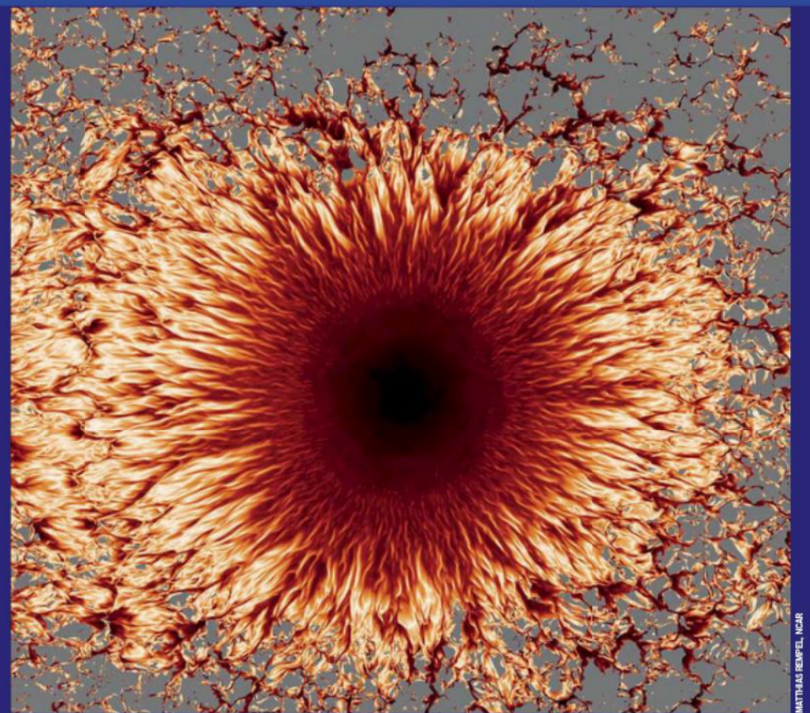
PABLOCARLOS BUDASSI

▲ *Univers observable,*
Pablo Carlos Budassi, 2012, illustration logarithmique

Tout l'Univers est rassemblé dans cette image inouïe, véritable exploit visuel issu de données de la Nasa et de l'université de Princeton. Le bord rouge du cercle matérialise le fond diffus cosmologique.

▶ Simulation de l'interface entre l'ombre et la pénombre d'une tache solaire,
Matthias Rempel, 2009

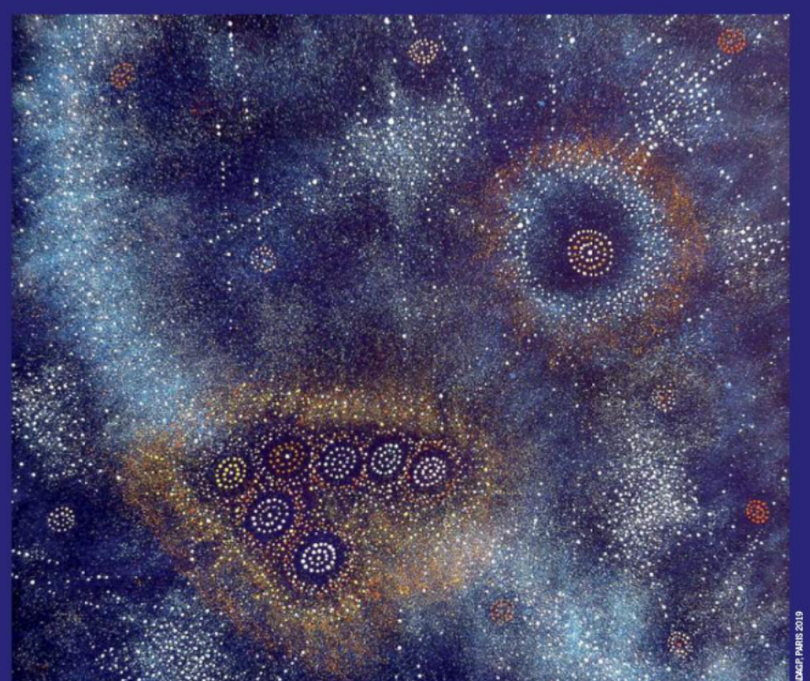
Effet artistique et hautement hypnotique pour cette représentation digitale 3D, vue du dessus, de la structure d'une tache solaire. La simulation visualise les champs magnétiques qui créent les taches en modifiant le flux du plasma solaire.



MATTHIAS REMPEL, NCAR

▶ *Seven Sisters Dreaming,*
Alma Nungarrayi Granites, 2012

Une légende répandue dans sa communauté a inspiré à cette artiste aborigène d'Australie la série dont est extraite cette peinture : sept sœurs harcelées par un amoureux s'échappent dans la Voie lactée… et forment les Pléiades, groupe d'étoiles de la constellation du Taureau.



ADAGP, PARIS 2019

GRANGER/BRIDGEMAN

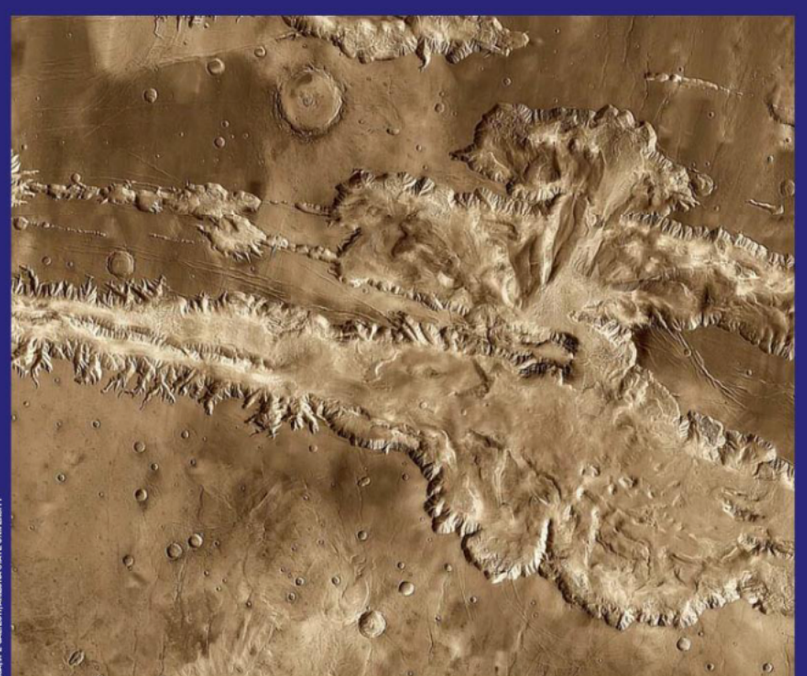
La Création du firmament, anonyme, vers 1180, mosaïque, cathédrale de Monreale, Italie

La cathédrale de Monreale, près de Palerme, abrite 6 500 mètres carrés de mosaïques, parmi lesquelles de splendides scènes consacrées à la Genèse. Ici, Dieu place le Soleil dans le disque bleu du firmament.

PETER DOIG. ALL RIGHTS RESERVED, DACS/ADAGP, PARIS 2019

▲ ***Milky Way,*** Peter Doig, 1989-1990

L'ondoiement brumeux de la Voie lactée au surplomb des eaux calmes d'un lac marque l'expression imprégnée de réalisme magique de l'Écossais Peter Doig, qui ancre néanmoins l'inspiration de sa peinture sur l'observation du réel, parfois à partir de photographies.



NASA, JPL-CALTECH, ARIZONA STATE UNIVERSITY

◀ **Valles Marineris, 2001,** image numérique composite

Le plus grand canyon connu dans le Système solaire – étiré en longueur, il aurait presque la largeur des États-Unis – se trouve sur Mars : c'est Valles Marineris, dont les reliefs saisissants, ci-contre, ont été immortalisés par la sonde Mars Odyssey.

Dans un Univers âgé de quelques centaines de millions d'années, des nuages d'hydrogène et d'hélium se sont effondrés sur eux-mêmes, déclenchant des réactions nucléaires et allumant les premières étoiles. En émettant un rayonnement ultraviolet, elles ont ionisé le Cosmos. Vue d'artiste.

NASA/HUBBLE SITE

Et les premiers soleils se mirent à briller

D'ardents colosses à la vie brève : tel est le portrait-robot des premiers astres qui ont peuplé le Cosmos, alors plongé dans l'obscurité des âges sombres. Des étoiles qu'espèrent observer les prochains télescopes.

PAR DENIS DELBECQ

Nous sommes environ 380 000 ans après le Big Bang. Après des débuts cataclysmiques, l'Univers s'est assagi. La soupe bouillante de particules de matière et de lumière, le plasma primordial apparu dans la première seconde de l'Univers, a cédé la place à un nuage composé d'environ 75 % d'hydrogène et 25 % d'hélium, teinté de traces de lithium et de béryllium. Un gaz d'éléments neutres qu'aucune source de lumière n'éclaire : c'est le début des âges sombres, une période qui s'étend sur des centaines de millions d'années. Après quoi, dans certaines régions de l'Univers, les premières étoiles et galaxies commenceront à se former, irradiant le Cosmos d'une lumière riche en ultraviolets dont l'énergie sera suffisante pour arracher les électrons des atomes. Cette réionisation de la matière neutre créera ça et là des bulles d'hydrogène ionisé qui enfleront et rempliront progressivement l'Univers, mettant un terme aux âges sombres.

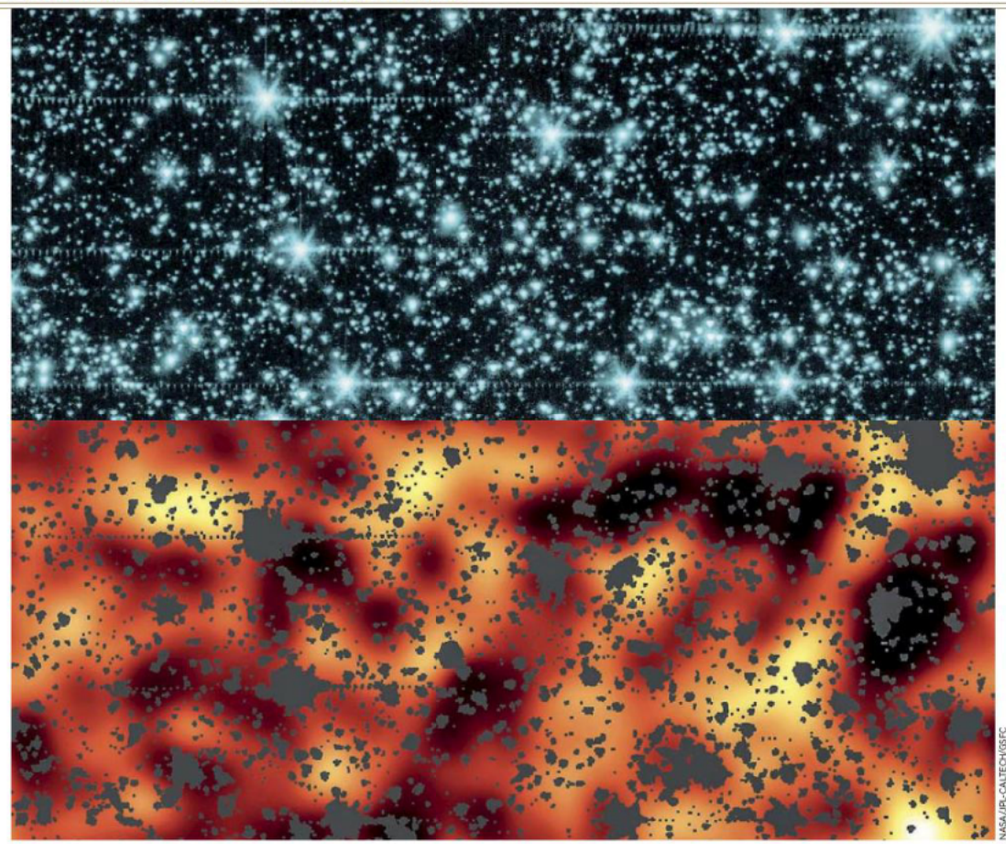
« C'est grâce à cela que l'on peut observer l'Univers aujourd'hui. Si le gaz était resté neutre, une grande part du rayonnement des étoiles ne pourrait traverser la matière intergalactique sans être absorbé », se félicite Patrick Petitjean, de l'Institut d'as- ●●●

Le site de la Nasa sur le télescope James Webb : https:// www.jwst.nasa.gov/

Le site de la station de Nançay : https://www.obs-nancay.fr/-NenuFAR-45-.html

Le site du Ska : https://www.skatelescope.org/the-ska-project/

Un documentaire de la BBC : *Aube cosmique. La naissance des premières étoiles* Science Channel, BBC, 2016



NASA/JPL-CALTECH/GSFC

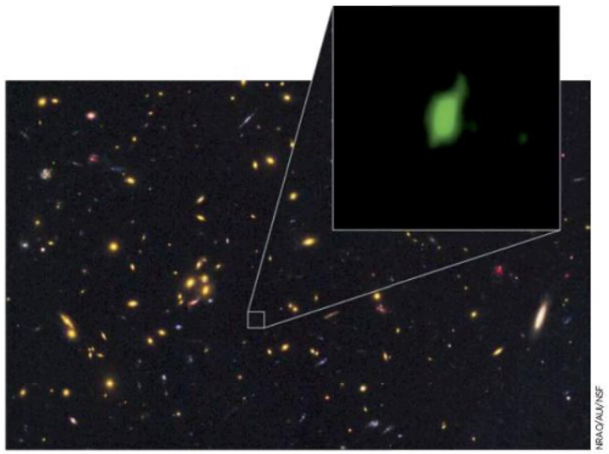
Étoiles et galaxies de la constellation du Dragon vues, en lumière infrarouge, par le télescope spatial Spitzer (en haut). Lorsqu'on masque ces astres (zones grises en bas), l'image laisse apparaître la lumière des premières étoiles.

●●● trophysique de Paris. *« On ne sait pas dater précisément le début ni la durée de cette réionisation*, pointe Alain Riazuelo, de l'Institut d'astrophysique de Paris. *On estime qu'elle a pu commencer 100 ou 200 millions d'années après le Big Bang. »* Ce qui est certain, *« c'est qu'autour de 800 millions d'années, le gaz de l'Univers était totalement ionisé, tel qu'il est encore aujourd'hui »*, complète Cécile Renault, du Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie de Grenoble (LPSC). Reste à comprendre ce qu'il s'est passé dans l'intervalle. *« Faute de pouvoir observer des astres de cette époque, encore inaccessibles à nos instruments, nous devons nous appuyer sur les modèles pour dérouler le fil des événements »*, précise Nicolas Laporte, de l'Institut Kavli de cosmologie de Cambridge (Grande-Bretagne).

Revenons, donc, 380 000 ans après le Big Bang. L'Univers, opaque, devient soudainement transparent et laisse échapper un flash de lumière, qui permet de cartographier la répartition de la matière dans le tout jeune Univers. C'est ce qu'on appelle le fond diffus cosmologique *(lire p. 26-27)*, qui montre la présence de grumeaux, régions plus riches en matière. L'avenir du Cosmos va précisément se jouer dans ces grumeaux. *« Probablement les plus petits »*, indique Alain Riazuelo. *« Sous l'action de la gravitation, des halos de matière – ordinaire et noire* [lire p. 71] *– ont commencé à s'effondrer sur eux-mêmes*, explique Nicolas Laporte. *Au point de déclencher des réactions de fusion nucléaire, allumant les premières étoiles. »* À quelle époque ? *« Pour le savoir, il faut remonter le temps en observant, de plus en plus loin, des signaux de plus en plus faibles »*, poursuit l'astrophysicien, qui a participé à l'observation de l'une des plus vieilles galaxies, la plus ancienne parmi celles dont la distance a pu être déterminée avec précision (par deux mesures distinctes). Il s'agit de Macs1149-JD1, annoncée en mai 2018. Cette prouesse est le fruit d'une combinaison des observations du radiotélescope Alma et du télescope optique VLT, installés dans le désert chilien. Macs1149-JD1 se présente telle qu'elle était il y a 13,28 milliards d'années. Autrement dit, environ 500 millions d'années après le Big Bang ! Les astronomes ont pu déterminer que les premiers astres de cette galaxie se seraient formées seulement 250 millions d'années après le Big Bang. Aurait-on enfin observé le graal, les premières étoiles de l'Univers ? Hélas, les astrophysiciens sont convaincus du contraire…

Pour comprendre pourquoi, il faut se pencher sur les réactions nucléaires qui fusionnent de petits noyaux en noyaux plus lourds. Un exemple : l'hélium – deux protons – est issu de la fusion de deux noyaux d'hydrogène, les plus légers de tous avec un seul proton. Puis apparaissent de petites quantités de lithium (3 protons), de béryllium, bore, carbone, azote, oxygène… et ainsi de suite jusqu'au fer (26 protons). Les éléments plus lourds (cobalt, nickel, cuivre, etc.) ne se forment pas dans les étoiles, mais dans l'onde de choc qu'engendre leur explosion. Un événement qui projette les matériaux de l'astre dans le Cosmos et contamine l'hydrogène et l'hélium primordiaux. Une fois refroidi, une partie de ce gaz contaminé peut à nouveau subir les effets de la gravitation et donner naissance à de nouvelles étoiles, plus petites et moins chaudes, qui contiennent dès leur naissance des éléments plus lourds que l'hélium. En fin de vie, celles-ci explosent, enrichissant à leur tour le cosmos en éléments lourds, avant que naissent de nouveaux astres. Nous en serions à la troisième génération, la « population I » disent les astrophysiciens qui, curieusement, ont décidé de compter à l'envers : les étoiles les plus anciennes appartenant à la « population III ».

En étudiant Macs1149-JD1, les astrophysiciens ont observé des indices de la présence d'oxygène ●●●



NRAO/AUI/NSF

La galaxie Macs 1149-JD1, l'une des plus anciennes jamais observées (en vert), comporte de l'oxygène, un élément qui n'a commencé à se former que dans les premières étoiles. Signe qu'elle fait partie de la deuxième génération d'objets célestes.

N. LAPORTE

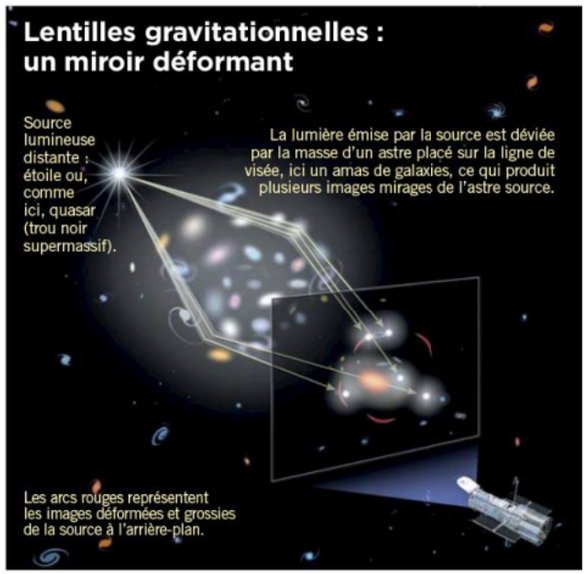
« S'effondrant sur eux-mêmes, des halos de matière ont déclenché des réactions nucléaires allumant les premières étoiles »
Nicolas Laporte, Institut Kavli de cosmologie de Cambridge

En Sologne, des antennes pointées vers l'aube cosmique

NENUFAR

Le réseau Nenufar sera composé, à terme, de 2 000 antennes.

En attendant l'avènement du Square Kilometer Array (Ska), l'Europe exploite Lofar, vaste réseau de radio-astronomie installé dans six pays européens. Ses 50 000 antennes tentent de capter, entre autres, des signaux témoignant de la réionisation de l'Univers. Basé en grande partie aux Pays-Bas, Lofar s'appuie en France sur la station de radioastronomie de Nançay, installée dans une forêt près d'Orléans pour échapper aux parasites, entre autres, de la bande FM. Un nouvel instrument baptisé Nenufar y a été inauguré en octobre dernier, sur une superficie de dix hectares. *« Il s'agit d'un réseau compact qui, à terme, comportera deux mille antennes – dont 1100 sont déjà en service. Cela permettra de gagner en sensibilité – la capacité à déceler de faibles signaux –, au prix cependant d'une faible résolution – l'aptitude à localiser la source »*, explique Philippe Zarka, l'un des responsables scientifiques du projet. Ces antennes fonctionneront seules ou en association avec Lofar. Suivant la fréquence, le gain de sensibilité pourra atteindre un facteur huit par rapport aux antennes de Lofar. *« Chaque fréquence radio correspond à des signaux qui proviennent d'un âge différent de l'Univers,* précise l'astrophysicien. *Nous espérons capter des données autour de 70 MHz, qui marqueraient l'aube cosmique, autrement dit le tout début de la réionisation… Mais c'est chercher une aiguille dans une meule de foin ! »*



NASA, ESA, AND A. FEILD (STSCI)

Véritable télescope cosmique, le phénomène de lentille gravitationnelle permet d'observer des astres lointains, donc jeunes, cachés par d'autres.

●●● qui suggèrent que ses étoiles se sont formées dans un nuage de gaz contaminé. Et donc que sa composition était incompatible avec celle des étoiles primordiales, formées, rappelons-le, à partir d'hydrogène et d'hélium seuls. Macs1149-JD1 appartient donc probablement à la population II.

Les premières étoiles, quant à elles, conservent encore leurs mystères, même si l'on peut en dresser le portrait-robot. *« Quand on modélise l'effondrement gravitationnel d'un nuage formé aux trois quarts d'hydrogène et à un quart d'hélium, il ne se forme que des étoiles très massives et très chaudes*, explique Cécile Renault. *Or la durée de vie d'une étoile est d'autant plus courte que celle-ci est massive. On estime que les premières étoiles pesaient l'équivalent d'une centaine de masses solaires et qu'elles n'ont vécu qu'une centaine de millions d'années avant d'exploser. »* Certains chercheurs penchent plutôt pour une taille d'un millier de masses solaires – ce qui induit une durée de vie de quelques millions d'années seulement.

COURTESY C. RENAULT

« On estime qu'elles n'ont vécu qu'une centaine de millions d'années avant d'exploser »
Cécile Renault, Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie de Grenoble

Les modélisations laissent penser que ces étoiles ne se sont pas formées seules dans leur coin, mais en petits groupes de quelques milliers. Des groupes qui ont ensuite donné naissance, par accrétion sous l'effet de la gravitation, aux premières proto-galaxies, aux galaxies, et enfin aux amas de galaxies tels qu'on en observe aujourd'hui beaucoup dans le ciel.

20 % des UV émis par les premières étoiles auraient suffi à réioniser tout l'Univers

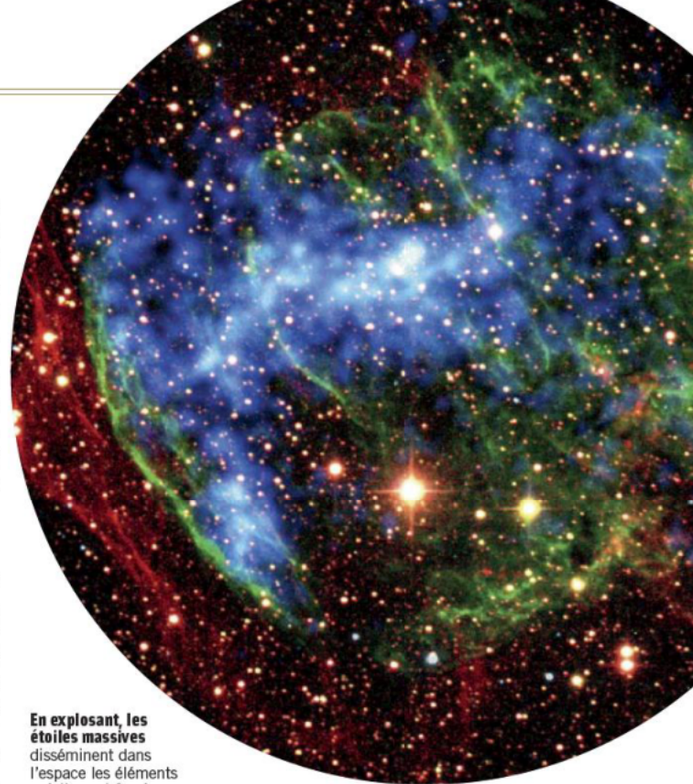
Bien plus chaudes que notre Soleil, les premières étoiles ont émis des quantités considérables de rayonnements ultraviolets qui ont peu à peu ionisé l'hydrogène et l'hélium rencontrés sur leur trajet, en arrachant leurs électrons. Ont-elles projeté assez d'UV pour réioniser tout l'Univers ? *« Cela semble très crédible*, répond Cécile Renault, *même si l'on n'exclut pas que d'autres mécanismes aient pu contribuer au phénomène, comme l'annihilation de matière noire ou la formation de trous noirs supermassifs. »* De son côté, Nicolas Laporte souligne que la réponse à cette question dépend des hypothèses : *« Si l'on considère que 10 % des photons ultraviolets émis par ces étoiles ont participé à la réionisation, le compte n'y est pas. Mais cette proportion pourrait être de 20 %, et dans ce cas, cela aurait suffi. »*

Pour lever le doute, il faudra en passer par de nouveaux instruments. Le premier d'entre eux est le James Webb Space Telescope (JWST) de la Nasa, dont le lancement est prévu en mars 2021. Doté d'un miroir primaire de 6,5 mètres de diamètre (contre 2,4 mètres pour son prédécesseur), le James Webb scrutera le ciel dans le domaine infrarouge, une gamme plus adaptée que le visible à l'étude des galaxies lointaines *(lire aussi p. 51-53)*. Le JWST est doté d'une sensibilité – une capacité à voir de faibles signaux – très améliorée par rapport à celle de Hubble. *« On s'attend à des performances incroyables, et l'on espère qu'elles seront suffisantes pour observer la lumière des premières étoiles »*, espère Patrick Petitjean.

Pour ce faire, les astrophysiciens comptent aussi sur un coup de main de la nature, un effet de grossissement qui permet de voir les sources les plus lointaines. C'est ce que l'on appelle la lentille gravitationnelle. Le principe en est relativement simple, même si l'interprétation des observations est complexe : la présence d'un champ gravitationnel intense, par exemple celui créé par un gros amas de galaxies, tend à courber la trajectoire de la lumière. Ce changement de direction permet de voir des objets qui se trouvent derrière l'amas tout en produisant un effet de loupe. C'est la version cosmique de nos lentilles de verre, qui grossissent l'objet qui se trouve derrière elles en changeant la direction des rayons lumineux envoyés par celui-ci. *« Ce phénomène naturel est une vraie merveille ! »*, se réjouit Cécile Renault. On peut compter sur les astrophysiciens pour doper ainsi les observations du James Webb qui, selon Nicolas Laporte, *« pourrait alors observer des objets qui brillaient quand l'Univers n'était âgé que de 150 millions d'années »*.

Simuler un récepteur d'ondes radio de plus d'un kilomètre de diamètre

Ce dernier n'est pas le seul instrument dont cherche à se doter la communauté scientifique. En France, l'observatoire de Nançay (près d'Orléans) vient d'inaugurer Nenufar, un réseau d'antennes de radio-astronomie qui viendra compléter, dès le printemps prochain, le réseau européen Lofar *(lire l'encadré p. 67)*. De quoi tester techniques d'observation et algorithmes en attendant l'avènement du futur Square Kilometer Array, le plus vaste radiotélescope de l'histoire. Il s'agira, dans un premier temps, de simuler avec un grand nombre d'antennes un récepteur d'ondes radio de plus d'un kilomètre de diamètre. Les applications sont multiples. Parmi elles, justement, l'étude de la réionisation du Cosmos grâce à l'établissement d'une carte du rayonnement émis par l'Univers lointain, caractérisé par un « pic » de signal à 21 centimètres, la longueur d'onde émise par l'hydrogène neutre quand il est chauffé par le rayonnement des étoiles qui l'éclairent. *« Les trous observés dans cette carte signaleraient la présence de régions dont l'hydrogène a été ionisé »*, explique Cécile Renault. *« Cela représente un défi considérable car ces signaux sont vraiment très faibles »*, ajoute Alain Riazuelo. *« Et un vrai challenge en matière de puissance de calcul et d'infrastructure de stockage et de communications*, souligne Cécile Renault. *Le flux de données du Ska sera plus important que celui des accès à Google et Facebook aujourd'hui ! »* Premières lumières prévues vers 2027. Cinq ans plus tard, l'Agence spatiale européenne pourrait lancer Theseus, un projet piloté par la France, s'il sort vainqueur d'une « compétition » avec deux autres satellites proposés par la communauté scientifique. *« Il s'agira de voir les premiers sursauts gamma – les événements cosmiques les plus violents – qui ont éclairé l'Univers très jeune. Il pourrait aider à déterminer la distribution de matière à cette époque*, indique Cécile Renault. *Mais que Theseus se fasse ou pas, d'ici une vingtaine d'années, les âges sombres vont s'éclairer pour nous ! »*■



CALTECH/SSC/RHOADS, J. JARRETT AND NASA/CXC/SSC/JREDMAN ET AL.

En explosant, les étoiles massives disséminent dans l'espace les éléments qu'elles ont forgés en leur sein. Ici, la nébuleuse W49B, résultat de l'explosion d'une supernova, située à 26 000 années-lumière dans la direction de la constellation de l'Aigle.

LEEMAGE/BRIDGEMAN

CÉCILE RENAULT* MON ŒUVRE D'ART PRÉFÉRÉE

« Adolescente, j'ai découvert par hasard une petite reproduction de *Ligne angulaire* qu'a peint l'artiste russe Vassily Kandinsky (1866-1944) pendant la période du Bauhaus, courant artistique allemand d'après la Première Guerre mondiale. J'ai appris ensuite, d'après ses livres, que ce tableau avait *« résonné avec [son] âme »*, pour reprendre ses mots. C'est à la fois mathématique et poétique, rigoureux et féerique, inutile et essentiel. Comme comprendre l'Univers. »

* Astrophysicienne

« interview

JAMES PEEBLES

Astrophysicien, lauréat du prix Nobel de physique en 2019

« Ce qui semblait inimaginable a maintes fois fini par être observé ! »

MARK MAKELA/GETTY IMAGES/AFP

Quelle a été, selon vous, votre contribution essentielle à la cosmologie ?

Il y a cinquante-cinq ans que je travaille dans ce domaine ! Et ce sont ces décennies d'efforts qui ont été récompensées par le Nobel, plus que telle ou telle contribution, même si certaines se sont révélées fructueuses.

Dans les années 1960, avec vos collègues de Princeton, vous avez théorisé l'existence du fond diffus cosmologique… Qu'avez-vous ressenti en en voyant les premières cartes trente ans plus tard ?

Ce fut à la fois une surprise et un grand bonheur. Quand nous avons commencé à travailler sur le fond diffus, nous ne savions pas s'il pourrait être un jour observé. Ni si, une fois détecté, nous pourrions interpréter ses propriétés de manière constructive. Mais nous disposions d'un radiomètre conçu pour l'observer lorsque sa découverte fortuite a été annoncée par Arno Penzias et Robert Wilson, en 1964.

Cependant, le véritable progrès, on le doit aux données du satellite Cobe et à John Mather (Nasa) qui a montré, en 1990, que ce rayonnement correspond à un spectre thermique – ce qu'on appelle un rayonnement de corps noir, un objet opaque et non réfléchissant maintenu à une température constante. Résultat confirmé un mois plus tard par Herbert Gush à l'université de Vancouver.

Pourra-t-on remonter dans le passé, au-delà de cette première lumière ?

Au cours de ma carrière, j'ai été maintes fois surpris de ce qui semblait inimaginable et qui a pourtant fini par être observé ! Les ondes gravitationnelles, par exemple, pourraient étendre la connaissance que l'on a du passé, à condition que l'on puisse mesurer des signaux correspondant aux instants qui ont suivi le Big Bang – des ondes gravitationnelles de grande longueur d'onde, pour lesquelles nous ne disposons pas encore d'instrument. Mais il y a une autre manière de remonter le temps : en étudiant les propriétés du fond diffus cosmologique. Celui-ci recèle des vestiges, des traces laissées par les ondes gravitationnelles émises par l'Univers primordial.

A-t-on manqué une pièce du puzzle permettant de reconstituer l'histoire du Cosmos ?

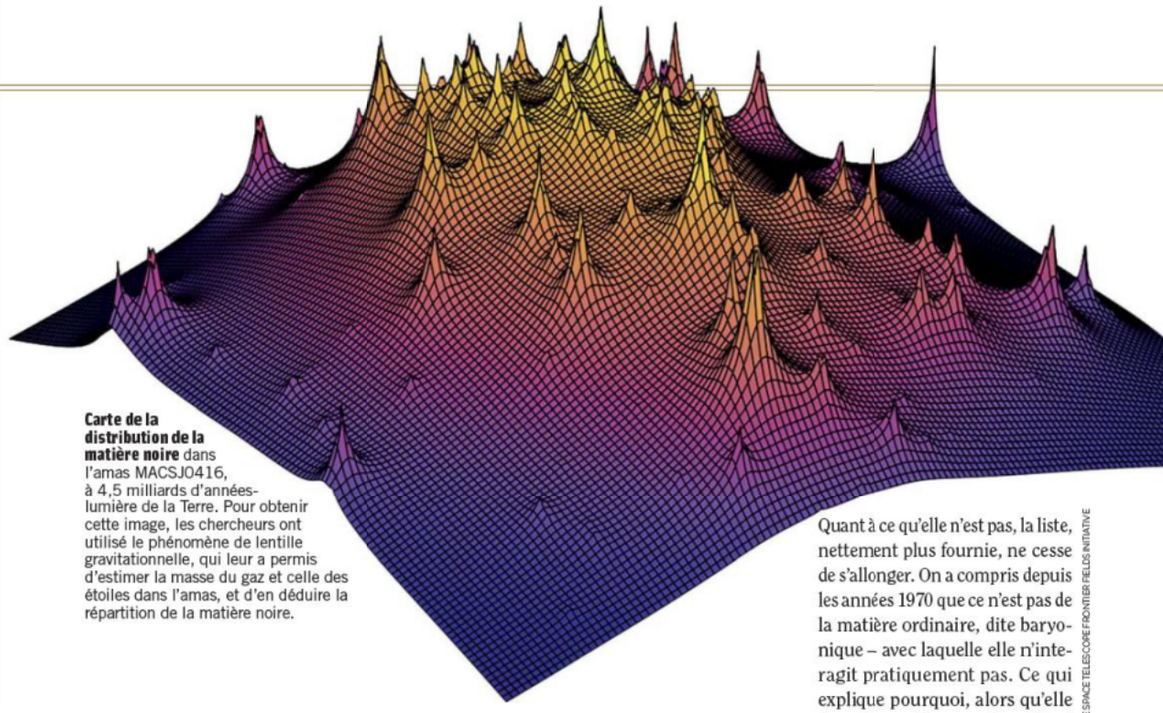
Des expériences ont étudié l'Univers de nombreuses manières, très différentes, et toutes racontent une histoire remarquablement cohérente, nous permettant de penser que le modèle standard est une approximation utile de la réalité. Cela ne veut pas dire qu'il représente la réalité ! D'ailleurs, je ne suis pas sûr que la notion même de réalité ait un sens…

Dans toutes les sciences de la nature, nous nous demandons toujours si nous n'avons pas négligé quelque chose pouvant conduire à une théorie qui marche aussi bien, voire mieux. J'adorerais pouvoir vous dire que c'est le cas. Nous avons par exemple des problèmes pour décrire correctement les galaxies spirales, qui possèdent un disque et un bulbe central. Celui-ci se forme de manière très naturelle dans les simulations numériques qui s'appuient sur le modèle cosmologique standard. Mais dans notre voisinage, la plupart des galaxies spirales n'ont pas de bulbe. Qu'avons-nous raté ? J'ai tendance à penser que leurs propriétés ont quelque chose à nous apprendre sur ce que j'appelle le secteur sombre de l'Univers, la matière et l'énergie noires. Celui-ci semble simple dans le modèle standard. Mais existe-t-il une seule chose dans la Nature qui soit simple ?

Il semble qu'il soit impossible de marier les cadres théoriques de la relativité générale et de la physique quantique pour expliquer la naissance de l'Univers…

Je me demande si cette idée d'une théorie du tout, de théorie absolue, est un concept utile. La science ne peut pas répondre à toutes les questions. Certaines sont tout simplement au-delà de nos capacités, des tests que l'on peut imaginer. Nous devons faire avec…

PROPOS RECUEILLIS PAR DENIS DELBECQ



NATARAJAN AND HUBBLE SPACE TELESCOPE FRONTIER FIELDS INITIATIVE

Carte de la distribution de la matière noire dans l'amas MACSJ0416, à 4,5 milliards d'années-lumière de la Terre. Pour obtenir cette image, les chercheurs ont utilisé le phénomène de lentille gravitationnelle, qui leur a permis d'estimer la masse du gaz et celle des étoiles dans l'amas, et d'en déduire la répartition de la matière noire.

Cette introuvable matière noire

On était sûr de la capturer. Et même de pouvoir en fabriquer… Échec sur toute la ligne ! La matière noire demeure le secret le mieux gardé de l'Univers.

Un spectre hante l'Univers. Une substance fantomatique qui semble passer comme un rêve à travers les planètes, nos corps, et même les filets dans lesquels les physiciens espèrent la piéger. Les raisons d'y croire ? Pour faire court : les étoiles dans les galaxies, les galaxies dans les amas et – à grande échelle – l'Univers lui-même semblent tous se mouvoir sous l'effet d'une gravité dont la matière ordinaire, celle que nous observons et qui nous constitue, n'explique que 20 %. La conclusion la plus simple est que les 80 % restants sont le fait d'une matière… que l'on ne voit pas.

En quoi peut bien consister cette « matière noire », dont l'existence a été suggérée par l'astronome américano-suisse Fritz Zwicky dans les années 1930 ? On sait qu'elle se comporte comme la matière : elle tend à se condenser sous son propre poids et à former des nuages. Et qu'à mesure que l'Univers s'étend, elle se dilue dans l'espace, exactement comme la matière sonnante et trébuchante. Elle est dite « noire » – une mauvaise traduction de l'anglais *dark* – parce qu'elle n'émet ni n'absorbe aucune lumière (on devrait donc plutôt la qualifier « d'invisible » ou de « transparente »). Et c'est à peu près tout…

Quant à ce qu'elle n'est pas, la liste, nettement plus fournie, ne cesse de s'allonger. On a compris depuis les années 1970 que ce n'est pas de la matière ordinaire, dite baryonique – avec laquelle elle n'interagit pratiquement pas. Ce qui explique pourquoi, alors qu'elle devrait constituer un brouillard particulièrement épais, nous passons au travers sans même nous en apercevoir.

Une propriété que possèdent les neutrinos, particules bien connues des physiciens : un neutrino solitaire traverserait sans encombre un mur de plomb d'une année-lumière d'épaisseur. Dans les années 1980, on a donc imaginé que si d'immenses nuages de ces particules baignaient l'Univers, ils pourraient constituer la matière noire. Hélas, on sait désormais que s'ils possèdent une masse, elle est bien trop modique pour qu'ils constituent des candidats plausibles. Car du fait de leur légèreté, ils se déplacent très vite, presque à la vitesse de la lumière, et ont tendance non pas à se rassembler en grumeaux, mais à se disperser. On parle de façon imagée de « matière noire chaude ». Or, tout montre qu'en s'effondrant sur elle-même au cours des premiers millions d'années de l'histoire cosmique, la matière noire a formé les régions d'intense gravité qui ont ●●●

●●● servi de germes à la croissance des grandes structures de matière ordinaire : les galaxies et les amas de galaxies actuels. Elle doit donc être « froide », c'est-à-dire constituée de particules semblables aux neutrinos, mais très massives. Exit, donc, l'hypothèse neutrinos.

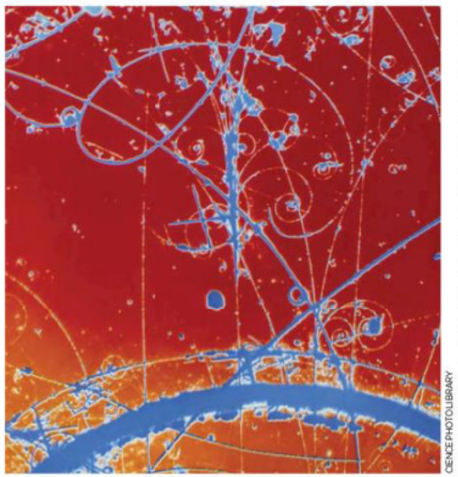
De vastes essaims de mini-trous noirs de la taille d'un proton

De son côté, autour de 1985, le célèbre physicien britannique Stephen Hawking (1942-2018) avança l'hypothèse que le Big Bang pourrait avoir produit une foule de mini-trous noirs (des astres compacts de quelques millions de tonnes et de la taille d'un proton). De vastes essaims de tels objets pouvaient-ils donc constituer la matière noire ? Les sondages du ciel à grande échelle ont démontré que des astres compacts et massifs existent bel et bien dans notre Voie lactée, mais en nombre très insuffisant pour expliquer la masse manquante.

Une lueur d'espoir apparut dans les années 1990. Pour faire fonctionner leurs modèles, les spécialistes de la théorie des cordes – qui fait l'hypothèse que les particules ne sont pas rigoureusement ponctuelles, mais étendues sous forme de petites cordes vibrantes – avaient en effet besoin d'une nouvelle sorte de symétrie. La « supersymétrie » fait correspondre à chaque particule de matière (ou fermion, *lire p. 28-29*) une particule véhiculant une force (ou boson) encore à découvrir. Et réciproquement : les bosons qui transmettent les forces connues (comme le photon pour la force électrique) sont censés avoir un « superpartenaire », un fermion de matière inconnue.

L'idée semblait si élégante qu'elle fut très largement adoptée – au-delà de la théorie des cordes –, d'autant qu'elle produisait une foule de miracles mathématiques dans les modèles des physiciens. En 1995, leurs calculs préliminaires suggérèrent même que l'Univers devait être littéralement saturé de « neutralinos », les plus légères des particules supersymétriques, exactement dans les quantités nécessaires pour expliquer la matière noire… Avait-on enfin trouvé l'oiseau rare ?

Pour les chercheurs, le plan était alors simple : d'une part, tenter de produire de la matière noire en laboratoire, dans les accélérateurs, tel le Cern sur la frontière franco-suisse : les violentes collisions qui y sont provoquées engendrent en effet des particules. Lorsque le boson de Higgs, qui confère leur masse aux autres particules, fut découvert, en 2012, personne ne douta que le neutralino, dont la masse est selon les modèles trois ou quatre fois supérieure, serait la prochaine à tomber dans l'escarcelle des physiciens. De leur côté, les astrophysiciens attaqueraient à revers en essayant de capturer la matière noire à l'aide de détecteurs, installés sous terre afin de s'affranchir des rayons cosmiques parasites.



SCIENCE PHOTO LIBRARY

Un neutrino interagit avec un proton dans une chambre à bulles. Longtemps candidats privilégiés pour expliquer la matière noire, les neutrinos ont été disqualifiés en raison de leur masse trop modique.

Faut-il jeter aux orties la supersymétrie ? L'échec de toutes les tentatives de détection de matière noire dans les observatoires souterrains fait craindre que ce soit fort possible.

Douche froide. Pour l'heure, le LHC du Cern a déjà exploré des énergies près de dix fois supérieures à celles de l'hypothétique « neutralino » et ni lui, ni les autres particules supersymétriques n'ont daigné apparaître. Est-ce à dire qu'il faut jeter aux orties la supersymétrie – et, dans la foulée, la théorie des cordes ? L'échec – après trente ans d'acharnement ! – de toutes les tentatives de détection de matière noire dans les observatoires souterrains fait craindre que ce soit fort possible.

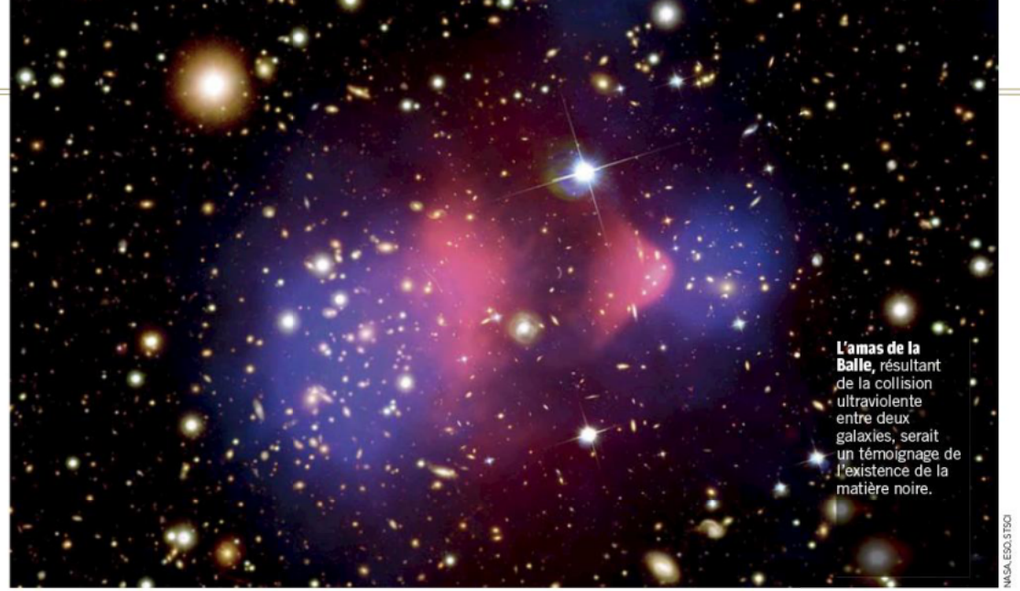
Des galaxies diffuses dépourvues de matière noire !

D'autres hypothèses reviennent donc sur le devant de la scène. Parmi elles, l'existence d'une particule appelée « axion », postulée dès 1977 pour résoudre certaines anomalies de la théorie des interactions nucléaires, et qui fait aujourd'hui l'objet de nouvelles expériences. Autre candidat : le « neutrino stérile », un neutrino incapable d'interagir avec la matière ordinaire autrement que *via* la gravitation. Il ne saurait exister dans le modèle actuel de la physique des particules. Mais ce modèle n'est que partiel puisqu'il prédit que les neutrinos n'ont pas de masse, ce que l'on sait faux…

Enfin, une autre possibilité a été proposée dans les années 1980 par le physicien israélien Mordehai Milgrom *(lire l'encadré)*. Si les prédictions de nos théories sur la gravitation sont fausses à l'échelle du Cosmos, a-t-il dit en substance, alors peut-être la matière noire n'existe-t-elle pas… Différentes modifications des lois de la gravité ont, depuis, été avancées dans l'espoir d'expliquer, à partir de la seule matière visible, la totalité des forces gravitationnelles à l'œuvre.

Alors… Les astrophysiciens auraient-ils couru pendant des décennies après une illusion ? Au moment même où cette éventualité regagnait du crédit, l'ironie cosmique frappait encore. L'observation cette année de galaxies diffuses dépourvues de matière noire a placé les théories de la gravitation modifiée telle celle de Milgrom dans une situation impossible : si la matière noire est une illusion, un effet de la matière ordinaire, on ne devrait jamais observer l'une sans l'autre ! L'existence d'une substance massive et exotique reste donc l'hypothèse la plus simple et celle qui correspond le mieux à toutes les observations. Nous voici revenus au point de départ. À ceci près qu'il est désormais clair que quelque chose de fondamental nous échappe… quant aux lois de la physique elle-même. ■

RENÉ CUILLIERIER



NASA, ESO, STScI

L'amas de la Balle, résultant de la collision ultraviolente entre deux galaxies, serait un témoignage de l'existence de la matière noire.

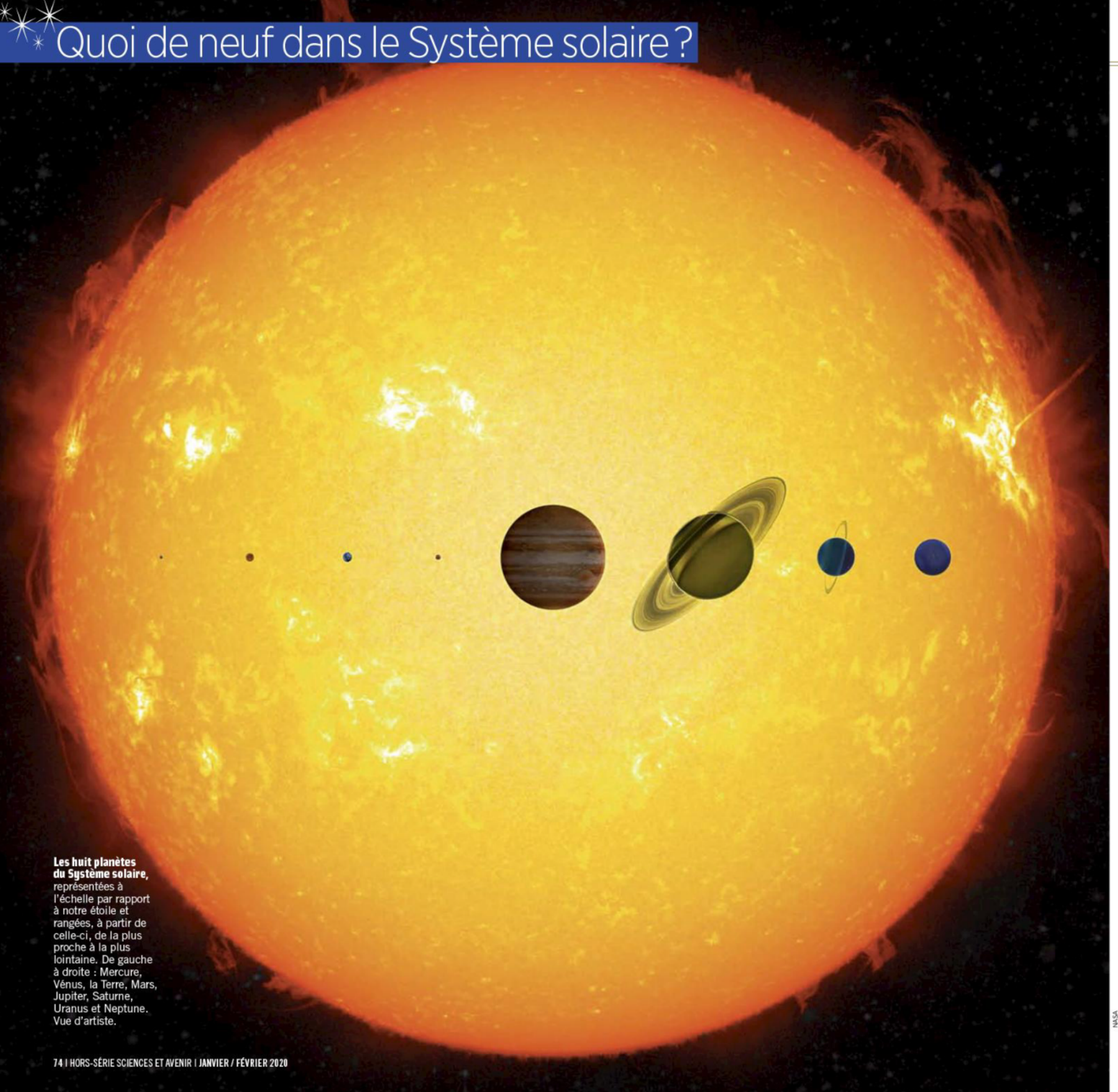
Une autre gravitation est-elle possible ?

En 1982, le physicien israélien Mordehai Milgrom observa que dans les galaxies spirales, les orbites des étoiles deviennent systématiquement aberrantes lorsque l'accélération qu'elles subissent – la pesanteur exercée par la matière à l'intérieur de leur orbite – tombe en dessous d'une certaine valeur. Selon lui, l'explication en était simple : on pouvait se passer de la matière noire en admettant que lorsque la gravité est ainsi très faible, elle ne diminue plus comme le carré de la distance – contrairement à ce que Newton avait stipulé – mais simplement comme la distance.

Il fallut plus de vingt ans pour trouver des versions de cette « dynamique newtonienne modifiée » compatibles avec la relativité d'Einstein – c'est-à-dire réalistes. Toutes donnent des résultats parfaits pour les galaxies, mais aussi pour les amas – à condition de leur adjoindre de la matière noire chaude (les très ordinaires neutrinos). En revanche, elles ne retrouvent jamais les propriétés précises de la carte du fond de rayonnement cosmologique.

Autre objection : selon la relativité générale, les objets massifs, les amas de galaxies par exemple, dévient la lumière et agissent comme des « lentilles gravitationnelles » en créant des images mirages des astres situés à l'arrière-plan. Les astronomes en déduisent la distribution de masse de l'amas et retrouvent systématiquement le halo diffus de matière noire obtenu à partir de l'analyse des vitesses des galaxies. Or les « théories modifiées de la gravitation » qui tentent de remplacer la relativité générale ont longtemps été incapables de reproduire ce résultat. Et même, dans le cas de l'amas de la Balle, résultat de la collision de deux amas de galaxies, n'y parviennent tout simplement pas. Le gaz intergalactique, qui représente les deux tiers de la matière ordinaire des amas, a été arraché aux galaxies lorsque les deux astres se sont traversés. Mais cette matière ordinaire n'est pas la source des mirages gravitationnels, comme ce serait le cas si la matière noire n'existait pas.

Pour parfaire le tableau, dans la galaxie NGC 1052-DF2, le mouvement des étoiles s'explique très bien à partir de la seule matière visible. Pourquoi cette matière ordinaire ne produit-elle pas une « gravitation modifiée » alors qu'elle le fait ailleurs ? Les « théories modifiées de la gravitation » – très complexes et peu naturelles – peinent donc à expliquer toutes les observations… quand l'hypothèse toute simple de l'existence d'une matière invisible y parvient sans encombre.



Les huit planètes du Système solaire, représentées à l'échelle par rapport à notre étoile et rangées, à partir de celle-ci, de la plus proche à la plus lointaine. De gauche à droite : Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. Vue d'artiste.

NASA

Un Système unique en son genre

Des lunes-océans susceptibles d'accueillir la vie, des planètes là où on ne les attendrait pas… Depuis quelques années, notre coin d'Univers se révèle d'une originalité inattendue.

PAR FRANCK DANINOS

« Le Système solaire apparaît comme atypique, exceptionnel même ! » s'exclame, enthousiaste, Francis Rocard, responsable des programmes d'exploration du Système solaire au Centre national d'études spatiales (Cnes). *« L'image que nous en avions a été totalement chamboulée ces dernières années. »* Cette singularité de notre coin d'Univers a été mise en lumière par la détection depuis 1995 de planètes orbitant autour d'autres étoiles que la nôtre, prouesse récompensée par le dernier prix Nobel de physique *(lire p. 36-38)*. Depuis, plus de 3 000 systèmes planétaires ont été identifiés. *« Mais à notre grand étonnement, aucun ne ressemble au nôtre ! »* atteste Francis Rocard. *« Celui-ci a dû vivre des évènements qui, en l'état actuel des connaissances, ne peuvent être généralisés ailleurs. »*

Avant la découverte de ces milliers de planètes lointaines, les astronomes se satisfaisaient assez bien d'un scénario expliquant pourquoi la partie interne du Système solaire, proche de notre étoile, est constituée de planètes rocheuses et relativement petites – Mercure, Vénus, la Terre et Mars –, tandis que la partie externe abrite des géantes de gaz et de glaces, Jupiter, Saturne, Uranus ●●●

Thérèse Encrenaz, James Lequeux, Fabienne Casoli, *Les Planètes et la vie*, EDP Sciences, 2019

Thorsten Dambeck, *Planètes : aux confins de notre système solaire*, Glénat, 2018

Francis Rocard et Florence Chiavassa, *Quelle est la véritable histoire du Système solaire ?* Le Pommier, 2014

L'exoplanète HD 188753 Ab, une planète gazeuse de la constellation du Cygne plus massive de 14 % que notre Jupiter, tourne autour de son étoile en seulement 80 heures. C'est qu'elle en est très proche : 8 millions de kilomètres, soit moins d'un vingtième de la distance Terre-Soleil. Vue d'artiste.

JPL-CALTECH, NASA

●●● et Neptune. L'élément clé de ce synopsis, dénommé « ligne des glaces », est une certaine distance par rapport au Soleil : environ 600 millions de kilomètres, soit quatre « unités astronomiques » (UA), une unité de ce type équivalant à la distance Terre-Soleil (150 millions de kilomètres). Au-delà de cette ligne, la température devient suffisamment froide pour que les éléments volatils, dont l'eau – le plus abondant d'entre eux –, se condensent en glace. Lors de la formation du Système solaire, il y a 4,56 milliards d'années, la quantité de matière solide était considérablement plus importante par-delà ce mur imaginaire que dans la partie interne. C'est donc dans cette région qu'en accrétant autour de leur noyau des poussières particulièrement grosses, de quelques centimètres de large, les premières planètes ont dû émerger. Notamment Jupiter, qui atteindra 318 fois la masse de la Terre ! En deçà de la ligne des glaces, des poussières submillimétriques et bien moins abondantes n'ont pu produire que des astres de taille modeste – les quatre planètes telluriques que nous connaissons.

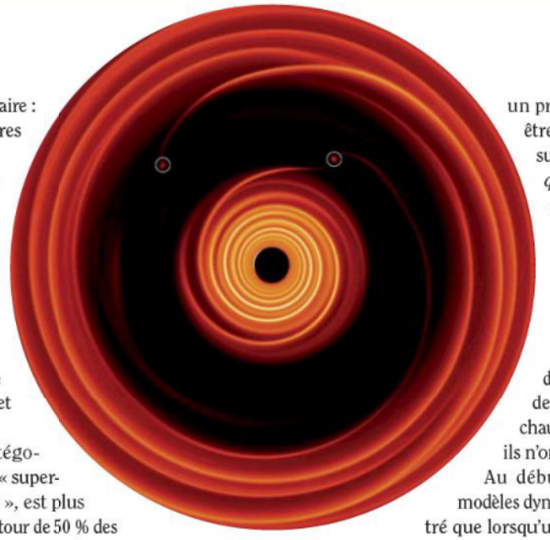
Peuplés de corps qui n'existent pas dans le Système solaire

On s'attendait à retrouver des structures plus ou moins similaires dans les autres systèmes planétaires. *« Or ils sont tous peuplés de corps qui n'existent pas ici ! »*, témoigne Alessandro Morbidelli, directeur de recherche à l'Observatoire de la Côte-d'Azur. À commencer par les tout premiers à avoir été identifiés en 1995, dénommés « jupiters chauds ». Leur masse est certes comparable à celle de Jupiter, mais ils sont quasiment « collés » à leur étoile – à moins de 15 millions de kilomètres. Les découvertes ultérieures montreront qu'ils sont cependant rares autour des étoiles de type solaire : seulement 1 % de ces dernières en possèdent.

Plus fréquents (10 %), les « jupiters tièdes » sont plus distants, entre 1 et 2 UA. Leurs orbites décrivent des trajectoires très excentriques, contrairement à celles de nos géantes gazeuses. Et ils demeurent bien plus proches de leur étoile que Jupiter et Saturne, à 5,2 et 9,7 UA respectivement.

Enfin, une troisième catégorie d'exoplanètes, baptisées « superterres » ou « minineptunes », est plus commune : on les retrouve autour de 50 % des étoiles de la galaxie. Mais la masse de ces corps plus ou moins rocheux peut atteindre jusqu'à dix fois celle de la Terre, et leur orbite est souvent plus petite que celle de Mercure, comme celle des jupiter chauds. *« Les techniques d'observation ne permettent pas, à l'heure actuelle, de détecter des exoplanètes analogues à la Terre, trop petites pour être perçues, ou à Neptune et Uranus, trop éloignées de leur étoile »*, concède Alessandro Morbidelli. De tels astres pourraient donc très bien exister... à notre insu. Force est néanmoins de constater que, contrairement à ce qu'on observe dans le Système solaire, les exoplanètes les plus massives orbitent toujours à proximité immédiate de leur étoile… et souvent dans des régions totalement désertes « chez nous »!

Les scientifiques ont dû se rendre à l'évidence : dans les scénarios de formation du Système solaire, un processus essentiel avait dû être négligé, qui expliquerait sa surprenante singularité. *« Ce que ces observations nous ont fait comprendre, c'est que les planètes, dans notre système comme ailleurs, ne sont pas restées sur leur lieu de naissance »*, explique l'astronome. C'est la seule façon d'expliquer la présence d'objets très massifs tout près de leur étoile, dans des régions chaudes et pauvres en matière où ils n'ont pu être fabriqués.



A. PIBERNS

Attraction, répulsion… Les interactions gravitationnelles de Jupiter et Saturne autour du Soleil lors de la formation du Système solaire auraient repoussé les deux planètes loin de l'étoile, selon la théorie du « grand virement de bord ». Les couleurs indiquent les vagues de densité créées par la gravité des planètes. Vue d'artiste.

Au début des années 2000, des modèles dynamiques ont en effet démontré que lorsqu'une planète commence à se former au-delà de la ligne des glaces, elle interagit gravitationnellement avec le gaz et les poussières environnants dès qu'elle atteint quelques dizaines de masses terrestres. Ces interactions modifient son orbite, qui décrit alors une spirale. *« Elle se rapproche ainsi de son étoile jusqu'à s'arrêter dans une région où le vent stellaire a soufflé l'intégralité des gaz,* explique Francis Rocard. *C'est ce qui a dû se produire pour les exoplanètes géantes et autres superterres. »*

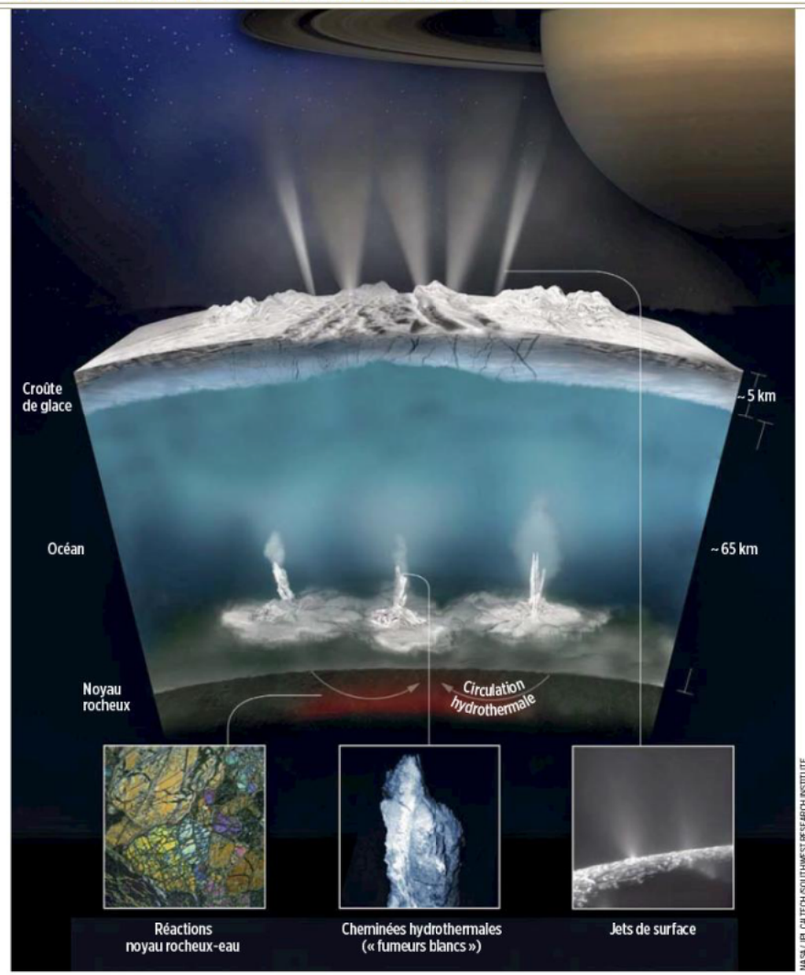
Mais comment expliquer, dès lors, l'absence de planètes très massives au voisinage du Soleil? Sous l'impulsion d'Alessandro Morbidelli, des scientifiques réunis initialement à l'observatoire de la Côte-d'Azur ont apporté des réponses très convaincantes avec le « modèle de Nice » en 2005 et celui du « Grand Tack » (ou « grand virement de ●●●

B. JUTONO

« Une série d'événements chanceux, liés notamment à la présence simultanée de Jupiter et Saturne, expliquerait la physionomie si particulière du Système solaire et l'existence d'une Terre où la vie a pu émerger » **Alessandro Morbidelli,** directeur de recherche à l'observatoire de la Côte-d'Azur.

Borisov, nouveau visiteur interstellaire

Les plus grands télescopes sont en ce moment braqués sur elle : la comète 2I/Borisov, découverte par l'astronome amateur ukrainien Gennady Borisov en août 2019, dans la constellation du Lynx. Elle a atteint, le 8 décembre dernier, son point le plus proche du Soleil, à 300 millions de kilomètres environ, et donc son maximum de luminosité. Il s'agit de *« la toute première comète interstellaire jamais identifiée »*, explique Nicolas Biver, chercheur à l'Observatoire de Paris. Autrement dit, elle ne fait que traverser notre système stellaire pour ne plus jamais y revenir. En 2017, un premier objet interstellaire baptisé 1I/Oumuamua nous avait déjà rendu visite. *« Mais il avait été détecté alors qu'il s'apprêtait à quitter le Système solaire. Nous n'avons eu ainsi que très peu de temps pour l'observer, contrairement à ce nouvel objet qui restera plus d'un an dans le champ des télescopes »*, poursuit l'astrophysicien. Ce n'est pas tout. Car si 1I/Oumuamua ressemblait à un astéroïde, très peu actif, 2I/Borisov se comporte comme une comète : elle éjecte des poussières et des gaz à mesure que son noyau se réchauffe et se rapproche du Soleil, d'où la « chevelure » brillante qu'on observe autour d'elle. *« En analysant la composition chimique et peut-être isotopique du halo, nous disposerons d'informations sur la nature du disque protoplanétaire où cette comète s'est formée*, précise Nicolas Biver. *Et d'une opportunité unique de tester le caractère du Système solaire… singulier ou universel. »*



F. ROCARD

« Dans ces gigantesques réservoirs d'eau liquide, les conditions d'habitabilité sont parfois réunies et une vie sous-marine pourrait donc exister »

Francis Rocard, responsable des programmes d'exploration du Système solaire au Cnes

●●● bord ») en 2011. Dans ces nouveaux scénarios, la clé de voûte est Jupiter. C'est elle qui se serait formée en premier, quelques millions d'années seulement après le Soleil et juste au-delà de la ligne des glaces. Après avoir atteint une masse suffisante, la jeune Jupiter aurait commencé à « spiraler » vers le Soleil jusqu'à une distance de 1,5 UA – typique des jupiters tièdes et position actuelle de Mars. Et se serait sans doute rapprochée davantage si un événement capital n'était intervenu à ce moment-là : la formation de Saturne. Créée à 4,5 UA, cette seconde géante gazeuse aurait grossi suffisamment pour déclencher elle aussi, et plus rapidement que Jupiter, sa migration. *« Par un jeu d'interactions gravitationnelles mutuelles, les deux planètes seraient entrées alors dans ce que nous appelons une résonance orbitale, Jupiter effectuant trois tours autour du Soleil quand Saturne n'en faisait que deux »*, explique Alessandro Morbidelli. Or ce phénomène aurait eu pour conséquence de « tirer » Jupiter vers l'extérieur ! Et conduit les deux mastodontes à opérer une marche arrière (d'où le « grand virement de bord ») tout en faisant barrage à Uranus et Neptune, les empêchant ainsi de se rapprocher de notre étoile. C'est pour ces raisons, somme toute contingentes, que nos planètes géantes seraient si éloignées du Soleil… et que nos planètes telluriques auraient eu, par la suite, la possibilité de se développer. *« Une série d'événements chanceux, liés notamment à la présence simultanée de Jupiter et Saturne ainsi qu'à leurs masses et positions de départ relatives, expliquerait ainsi la physionomie si particulière du Système solaire et l'existence d'une Terre où la vie a pu émerger »*, convient Alessandro Morbidelli.

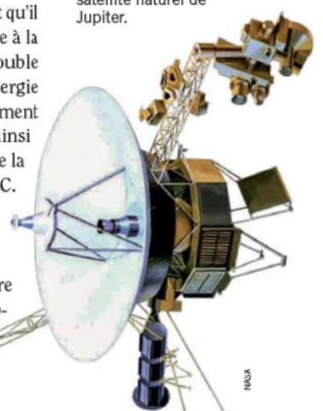
Les geysers chargés de molécules organiques qui jaillissent d'Encelade, une petite lune de Saturne, témoignent de l'existence d'un océan sous sa croûte de glace. Il serait constellé de cheminées hydrothermales favorables à l'apparition de la vie. De plus, le noyau de la planète serait le siège de frottements intenses, contribuant à réchauffer l'océan.

La Terre, oasis de vie peut-être pas si unique en son genre… Car c'est l'autre grand changement de perspective : non seulement notre système planétaire est unique, mais son « habitabilité » – sa capacité, autrement dit, à développer et accueillir la vie, grâce à la présence d'eau liquide notamment – a été revue nettement à la hausse. Jusqu'ici, les hypothèses s'étaient focalisées sur la surface de Vénus et, surtout, Mars. Celle-ci a effectivement été habitable dans un lointain passé avant de devenir un astre désertique *(lire l'interview p. 81)*. Mais ces dernières décennies ont montré qu'à des centaines de millions, et même des milliards, de kilomètres du Soleil, des lunes-océans abritent de gigantesques réservoirs d'eau liquide. Non pas en surface, mais sous leur croûte gelée, *« où les conditions d'habitabilité sont parfois réunies et où une vie sous-marine pourrait ainsi potentiellement exister »*, explique Francis Rocard.

Tout commence en 1979, lorsque la sonde de la Nasa Voyager 1 survole Jupiter et ses quatre plus gros satellites naturels, Io, Europe, Ganymède et Callisto. Tout de suite, les photographies d'Europe intriguent les astronomes : elles révèlent un extraordinaire réseau de failles et de lignes sombres sur ce corps glacé presque aussi gros que la Lune, suggérant l'existence de plaques se déplaçant au-dessus d'un milieu liquide, un peu comme une banquise. Vingt ans plus tard, le magnétomètre d'une autre sonde américaine, Galileo, dévoile sous la glace une couche électriquement conductrice, *« le meilleur candidat étant un réservoir d'eau liquide et salée enveloppant la totalité de l'astre »*, indique Gabriel Tobie, chercheur au Laboratoire de planétologie et géodynamique à Nantes. Des dépôts de sels (sulfates et carbonates de magnésium et de sodium) sont par ailleurs identifiés en surface, qui s'expliqueraient là encore par la présence d'un océan subglaciaire et l'évaporation de remontées d'eau salée. Entre 2012 et 2016, le télescope spatial Hubble complète le puzzle : il observe des panaches de vapeur d'eau de 200 kilomètres de hauteur, expulsés manifestement depuis l'intérieur d'Europe. Enfin, en 2018, des scientifiques américains acquièrent la certitude que Galileo a traversé vingt ans plus tôt, et sans le « savoir », de tels jets de vapeur.

« L'existence d'un océan salé global sous la surface d'Europe ne fait quasiment plus de doute, assure Gabriel Tobie, *l'incertitude résidant plutôt dans sa localisation en profondeur. »* Selon les estimations, il serait enfoui sous 10 à 50 kilomètres de glace… et dépasserait 100 kilomètres d'épaisseur ! À comparer avec les 3,8 kilomètres de profondeur moyenne des océans terrestres : même si Europe est elle-même bien plus petite que la Terre, son océan global serait ainsi bigrement plus vaste – un monde en soi ! Mais ce qui le rend particulièrement intéressant est qu'il serait en contact direct avec un sol semblable à la croûte terrestre. Ces roches auraient un double effet. Elles permettraient des échanges d'énergie avec l'intérieur du corps céleste et potentiellement des remontées de lave en fusion, rendant ainsi possible la persistance d'eau liquide alors que la température externe ne dépasse pas -150 °C. Et elles solubiliseraient diverses molécules. Une chimie pré-biotique et peut-être même microbienne pourrait ainsi théoriquement s'y développer, même en l'absence de lumière solaire. *« Comme autour des cheminées hydrothermales terrestres »*, rappelle Gabriel Tobie. ●●●

Avant de quitter pour toujours le Système solaire en 2012, la sonde Voyager 1 a survolé ses planètes lointaines, révélant notamment d'intriguants détails sur Europe, un satellite naturel de Jupiter.


NASA

Uranus et Neptune, deux « géantes » exaltantes

Dans le Système solaire, Uranus et Neptune sont les deux planètes les plus lointaines de notre étoile, à respectivement 2,9 et 4,5 milliards de kilomètres. *« Ce sont les grandes oubliées ! »*, souligne l'astrophysicien Francis Rocard. Elles n'ont été visitées que par une seule et unique sonde spatiale : l'infatigable Voyager 2, qui navigue actuellement à plus de 19 milliards de kilomètres de son lieu d'origine, hors de la zone d'influence du vent solaire qu'elle a quittée fin 2018. Lancée en 1977, elle a survolé Uranus en 1986 et Neptune en 1989, livrant d'incroyables clichés de ces « géantes de glace » : bleu pâle pour la première, bleu profond pour la seconde. Elles pourraient être constituées de glaces d'eau, de méthane et d'ammoniac.
Uranus présente une particularité unique dans le Système solaire : son angle de rotation est quasiment parallèle au plan orbital. Elle semble ainsi rouler sur son orbite comme une boule de billard. Par ailleurs, des chercheurs britanniques ont découvert en 2017 qu'elle génère un mystérieux champ magnétique qui « clignote », s'ouvrant et se refermant de façon intermittente. Neptune, pour sa part, possède une lune, Triton, qui abrite une activité géologique significative ainsi que de nombreux geysers crachant des gaz d'azote et des poussières organiques, suggérant l'existence d'un océan souterrain et d'un milieu potentiellement habitable. *« Pour mieux comprendre ces objets célestes, de nombreux astronomes souhaitent qu'une mission succède enfin à Voyager 2 »*, indique Francis Rocard. La Nasa étudie ainsi, en coopération avec les Européens, plusieurs projets ambitieux visant à envoyer des orbiteurs et des sondes atmosphériques vers Uranus et Neptune ainsi qu'un atterrisseur sur Triton.

PHILIPPE LOGNONNÉ* MON ŒUVRE D'ART PRÉFÉRÉE

« Je suis profondément fasciné, et inspiré, par les civilisations humaines qui ont élaboré des architectures sacrées à partir des orbites des planètes et des positions des astres. Une des plus étonnantes se trouve en Sardaigne : c'est le puits sacré de Santa Cristina di Paulilatino, dédié au culte de l'eau. Il a été édifié aux XIIe-XIe siècles avant J.-C. par la culture nuragique. L'hypogée recèle une source toujours active que la lumière du Soleil éclaire une fois par an. »

* Géophysicien et planétologue.

MATTEO OPPO

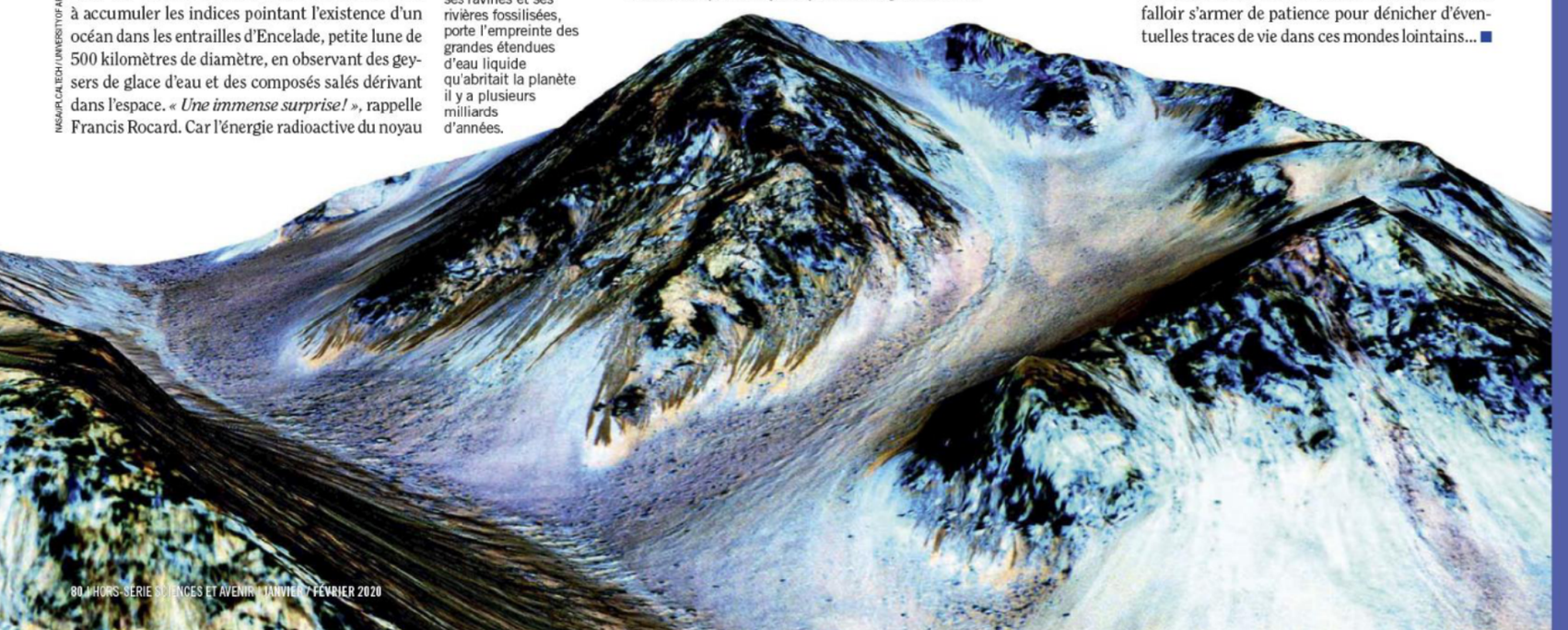
●●● Or cet océan souterrain est loin d'être un cas isolé. Selon les mesures de champ magnétique réalisées par Galileo, tout porte à croire que Ganymède et Callisto abritent eux aussi des océans subglaciaires, même si les modèles suggèrent qu'ils seraient piégés entre deux couches de glace (et non « posés » sur un manteau silicaté), réduisant ainsi les perspectives en termes d'exobiologie.

Plus loin dans le Système solaire, du côté de Saturne, la mission Cassini-Huygens, lancée en 1997 par la Nasa et l'Esa, a commencé en 2005 à accumuler les indices pointant l'existence d'un océan dans les entrailles d'Encelade, petite lune de 500 kilomètres de diamètre, en observant des geysers de glace d'eau et des composés salés dérivant dans l'espace. « *Une immense surprise!* », rappelle Francis Rocard. Car l'énergie radioactive du noyau est largement insuffisante pour empêcher l'eau de geler. « *Une autre source de chaleur est donc nécessaire*, souligne Gabriel Tobie. *Elle provient de la structure poreuse et déformable du noyau. Soumis aux forces de marée très intenses exercées par Saturne, ses grains frottent en effet les uns contre les autres en chauffant l'eau infiltrée.* »

Entre 2011 et 2016, Cassini a en outre démontré que Titan, Mimas et Dioné, trois autres lunes de la « géante aux anneaux », recelaient elles aussi de tels réservoirs… Sans parler de Triton, satellite de Neptune, ou encore de Cérès, une planète naine. « *L'existence d'océans souterrains apparaît ainsi, désormais, comme un schéma normal. Il y en aurait plus d'une vingtaine, et potentiellement beaucoup plus si l'on considère les gros objets de la lointaine ceinture de Kuiper [au-delà de l'orbite de Neptune, ndlr]* », précise Gabriel Tobie.

Dans ce panthéon, Encelade occupe une place de choix. Car Cassini a pu analyser les particules qu'on pense venir directement de l'océan. On y a trouvé non seulement de l'eau et des sels, mais aussi de l'hydrogène moléculaire, du méthane, de grosses molécules carbonées… Et même, selon des résultats publiés en octobre 2019, des molécules organiques solubles contenant de l'azote et de l'oxygène… précurseurs, sur Terre, des acides aminés ! « *Autant de preuves qu'un processus hydrothermal est à l'œuvre au fond de l'océan d'Encelade. Et que la chimie complexe qu'il génère pourrait alimenter de petites bactéries… si celles-ci voulaient bien se former* », indique Francis Rocard. Encelade est en tout cas le seul endroit, en dehors de la Terre, « *dont on peut garantir qu'il est actuellement habitable – ce qui ne veut pas dire qu'il soit habité* », insiste pour sa part Gabriel Tobie. Il réunit en effet ces trois conditions essentielles que sont la présence d'eau liquide, une source d'énergie et des composés organiques. Seule inconnue : la période depuis laquelle cet environnement est stable, un point crucial pour la possible émergence de vie.

« *Europe est sans doute habitable elle aussi, mais on n'a pas encore pu le confirmer* », note Gabriel Tobie. C'est en visant cet objectif que l'Esa et la Nasa peaufinent d'ambitieuses missions vers les lunes de Jupiter. La mission européenne Juice (Jupiter Icy Moons Explorer), qui partira en 2022, étudiera tout particulièrement Europe, Callisto et Ganymède avec une mise en orbite de la sonde autour de cette dernière. Baptisée Europa Clipper, la mission américaine s'envolera en 2023 pour se concentrer exclusivement sur Europe. Parmi ses objectifs : déterminer les régions où la banquise serait la plus fine afin d'y envoyer ultérieurement… un atterrisseur ! Les deux sondes n'arriveront toutefois à destination qu'autour de 2030. Il va donc falloir s'armer de patience pour dénicher d'éventuelles traces de vie dans ces mondes lointains… ■



NASA/JPL-CALTECH/UNIVERSITY OF ARIZONA

Le paysage tourmenté du cratère Hale, sur Mars, avec ses ravines et ses rivières fossilisées, porte l'empreinte des grandes étendues d'eau liquide qu'abritait la planète il y a plusieurs milliards d'années.

66 interview

PHILIPPE LOGNONNÉ

Géophysicien et planétologue à l'Institut de physique du globe de Paris, à l'université de Paris et au CNRS

« Mars, seule planète où l'homme peut se projeter »

S. DESAKUTIN / AFP

Quatre missions vont s'envoler vers Mars en 2020, portant celles-ci à une cinquantaine depuis les années 1960. Comment expliquer l'attrait de cette planète?

C'est bien sûr l'une des plus accessibles. Mais surtout, Mars occupe une place à part, parce que c'est la seule où l'homme, en tant qu'espèce pensante, arrive à se projeter dans un possible habitat. Elle peut être atteinte, en effet, en seulement quelques mois, possède des nuages et une fine atmosphère – certes irrespirable –, conserve de l'eau sous forme de pergélisol, et n'est pas si froide que cela. Elle suscite également des projets de terraformation visant à modifier ses propriétés actuelles afin que des humains puissent y vivre. Depuis les années 1970, plusieurs découvertes ont nourri cet imaginaire.

Qu'ont-elles révélé ?

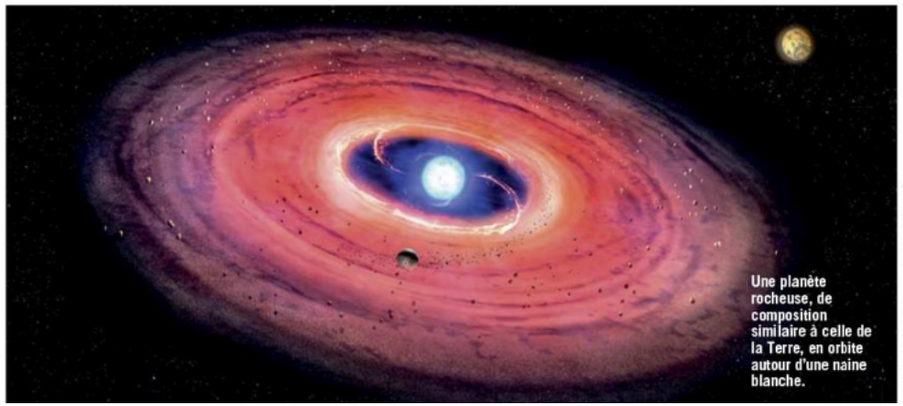
Des rivières fossilisées, des canyons et autres dépôts argileux, preuves que Mars a abrité de grandes étendues d'eau liquide il y a 4 milliards d'années. Des orbiteurs ont également révélé qu'elle avait bénéficié d'un champ magnétique protecteur et d'un volcanisme actif. Mars est ainsi l'unique planète, hormis la Terre, dont on pense qu'elle a été habitable dans un lointain passé. Elle est donc devenue l'endroit rêvé pour répondre à ces deux questions : est-ce que la vie est apparue ailleurs que sur Terre ? Et si c'est le cas, pourquoi n'a-t-elle survécu qu'ici-bas ? Ces vingt dernières années, une kyrielle d'engins ont donc été lancés vers la planète rouge pour étudier l'histoire de l'eau. Et depuis février 2019, à l'aide d'un sismomètre notamment, la mission InSight scrute ses entrailles, clé pour comprendre son évolution.

Qu'apporteront les missions qui seront lancées cet été ?

Mars est le nouveau « terrain de jeu » des puissances spatiales récentes ou émergentes. Ainsi, les Émirats arabes unis, qui mettront en orbite une sonde (Hope) pour examiner l'atmosphère martienne, visent aussi un objectif politique : célébrer le cinquantième anniversaire de leur indépendance. Quant à la Chine, après ses succès depuis un an dans l'exploration de la face cachée de la Lune, elle souhaite réaliser un nouveau coup d'éclat : envoyer un orbiteur, une plateforme d'atterrissage mais aussi un rover traquer des biosignatures. Les missions européenne (ExoMars 2020) et américaine (Mars 2020) déploieront elles aussi des véhicules mobiles cherchant des signes d'une vie passée. Avec un objectif supplémentaire pour les Américains : stocker les échantillons qui ont le plus de chance de receler des indices en vue de les rapatrier sur Terre et de les analyser en laboratoire. La première étape commencera dès l'été prochain.

Page réalisée par Sara de Lacerda

Sur notre site



Une planète rocheuse, de composition similaire à celle de la Terre, en orbite autour d'une naine blanche.

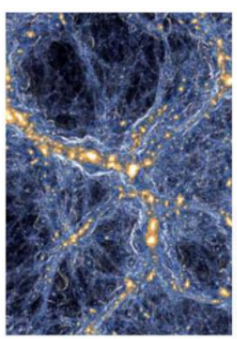
UNIVERSITY OF CALIFORNIA, LOS ANGELES MARIKA GARLICK

La Terre pourrait avoir des jumelles

Les naines blanches sont des cadavres d'étoiles comme le Soleil, réduites à un noyau extrêmement dense et chaud. L'environnement de certaines d'entre elles est riche en éléments lourds comme le fer, l'oxygène, le calcium ou le magnésium, restes de planètes et d'astéroïdes orbitant autrefois autour d'elles. En mesurant le taux de fer oxydé dans le spectre de six de ces naines blanches dites « polluées », des chercheurs se sont aperçus que les corps disparus étaient constitués des mêmes éléments que les planètes rocheuses du Système solaire. L'oxydation impliquant une tectonique des plaques et un champ magnétique, ce résultat laisse donc penser qu'il pourrait y avoir des planètes semblables à la Terre quelque part dans l'Univers.
https://sclav.fr/compositionexo

Une nouvelle forme pour l'Univers ?

Le modèle cosmologique actuellement prédominant pourrait être remis en cause, selon de récentes analyses. Renforcé depuis une décennie par les données des satellites WMap et Planck, il implique un Univers plat, où la courbure de l'espace est nulle, essentiellement composé – outre la matière ordinaire – d'énergie noire générant son expansion et de matière noire en moindre proportion. Une équipe d'astrophysiciens italiens évoque cependant la possibilité d'un Univers fermé, de forme sphérique, où la courbure de l'espace serait positive. Leur hypothèse s'appuie sur une évaluation différente du taux d'expansion de l'Univers et de la masse à l'origine de la déviation de la lumière du fond diffus cosmologique. Une nouvelle analyse des données d'observation paraît toutefois nécessaire avant de remettre en question un modèle théorique corroboré, par ailleurs, par bien d'autres observations.
https://sclav.fr/universplat

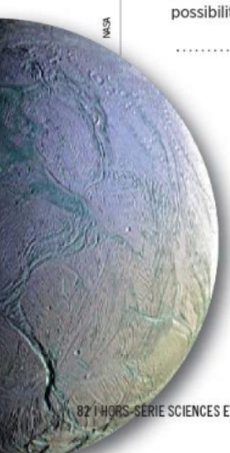


L'Univers est parcouru de filaments de matière.

COLLABORATION ILLUSTRIS TNG

Encelade, lune propice à la vie

Grâce à la sonde Cassini de la Nasa, placée en orbite autour de Saturne entre 2004 et 2017, on savait déjà qu'Encelade, satellite de la planète, possède une géologie active et abrite sous sa surface une immense nappe d'eau, d'où jaillissent des geysers composés de vapeur d'eau, de gaz et de glace. De nouvelles analyses des données transmises par Cassini se focalisent à présent sur des grains de glace émis par Encelade, retrouvés dans un anneau de Saturne. Selon une équipe de l'Université libre de Berlin, ces grains contiendraient des molécules organiques (dioxyde de carbone, oxygène, hydrogène) qui se seraient diluées dans l'océan souterrain du satellite avant de s'évaporer, se condenser et enfin s'échapper en s'agglomérant à la glace. La présence d'eau et d'énergie étant attestée sur Encelade, la découverte de ces molécules organiques, précurseurs de la synthèse des acides aminés, indique qu'y sont réunies les conditions d'apparition de la vie.
https://sclav.fr/Encelade



L'océan de la petite lune de Saturne renferme des molécules organiques.

NASA

ET AUSSI

Les protoplanètes fabriquent leur propre atmosphère
https://sclav.fr/exoatmosphere

Sur Mars, le cratère Gale était autrefois rempli d'eau salée
https://sclav.fr/saumureMars

Analyse de nouvelles images de la comète interstellaire 2I/Borisov
https://sclav.fr/images2IBorisov

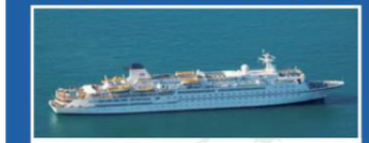
Les filaments cosmiques d'hydrogène, architectes de l'Univers, enfin visibles
https://sclav.fr/filamentscosmiques

Le raccordement des deux parties du télescope James Webb est en soi un véritable exploit
https://sclav.fr/assemblageWebb

Voyager 2 a passé l'héliopause
https://sclav.fr/Voyager2solaire

DU 13 AU 21 JUIN 2020

PARIS - BRÊME REYKJAVIK - PARIS



Jour	Escales	Arrivée	Départ
13/06	Paris / Bremerhaven *(Allemagne)*		15h00
14/06	En mer		
15/06	Lerwick *(Iles Shetland)*	08h00	13h00
16/06	Torshaven *(Iles Feroé)*	08h00	13h00
17/06	Seydisfjordhur *(Islande)*	13h00	18h00
18/06	Husavik *Islande)*	09h00	17h00
19/06	Isafjordhur *(Islande)*	08h00	17h00
20/06	Reykjavik *(Islande)*	08h30	nuit à quai
21/06	Reykjavik *(Islande)* / Paris		-

À partir de 2.240 €
par personne en **cabine intérieure, catégorie 1** occupée par **2 personnes.**
(vols internationaux inclus, **hors excursions optionnelles et pourboires facultatifs**)

Ce prix comprend :
- La croisière à bord du M/s Berlin en pension complète du dîner du 1er jour au petit déjeuner du dernier jour, boissons aux repas incluses.
- Les vols (réguliers ou affrétés) Paris - Brême et Reykjavik-Paris.
- La présence (* sauf raison de force majeure) pendant toute la croisière, et les conférences, des scientifiques invités par Sciences et Avenir.
- Des animations de qualité chaque soir variétés, soirée classique etc.).
- L'équipe d'encadrement Plein Cap.
- Les assurances assistance rapatriement.

Les croisières du
SAVOIR
SCIENCES
ET AVENIR

ISLANDE, LE FEU, LA GLACE, LES HOMMES

DOMINIQUE LEGLU
Directrice des rédactions de *Sciences et Avenir* et *La Recherche*

RÊVE DE GLACE. Les noms, à eux seuls, font rêver : Isafjordur, Husavik, Osvor... Et même celui de la capitale, Reykjavik, qui sonne comme une stalactite de glace. Avec l'Islande, mot francisé de l'Iceland (terre de glace en anglais), surgissent des images de fjords, de baleines, de geysers. Le pays souffle d'emblée le froid, le chaud et l'envie d'en savoir plus. Cela tombe bien. A bord du Ms. Berlin, aux côtés de Yves Coppens, préhistorien-parrain des Croisières du Savoir, embarqueront trois connaisseurs des trésors que recèlent ces lieux. Les fameuses sagas islandaises, que décryptera la docteure en études nordiques Gaëlle Reneteaud. Mais aussi l'océan si froid et si riche en poissons et mammifères marins, sans secret pour Gilles Boeuf, ancien directeur du Museum et ami de Sciences et Avenir. Quant aux volcans sous la glace, le Pr Jacques-Marie Bardintzeff nous en dressera un portrait saisissant. Et nous n'oublierons pas la découverte des îles Shetland et du port du dieu Thor (Torshaven) dans les îles Féroé. Vite, embarquons.

ILS SERONT AVEC VOUS PENDANT TOUTE LA CROISIÈRE *

YVES COPPENS

Paléontologue, spécialiste mondialement connu de l'évolution humaine, académicien et professeur au Collège de France. Il nous parlera du peuplement des îles que nous allons accoster, de la préhistoire aux moines irlandais et aux Vikings. Dernier ouvrage paru : « *Origines de l'Homme, origines d'un homme* ».

GAËLLE RENETEAUD

Docteur en Etudes Nordiques de l'Université Paris-Sorbonne, spécialiste de l'Islande. Elle nous dira ce que sont les *sagas* et leur place dans la culture islandaise et nous racontera le regard porté sur l'Islande dans la cartographie ancienne et les premiers récits de voyage. Dernier ouvrage paru : « *Le(s) Nord de Xavier Marmier* ».

GILLES BOEUF

Biologiste, spécialiste de la biodiversité marine et terrestre, professeur à Sorbonne-Université. il nous expliquera l'extraordinaire richesse du monde marin, ainsi que l'importance vitale pour l'humanité, mais aussi l'extrême fragilité, de la biodiversité. Dernier ouvrage paru : « *La biodiversité, de l'océan à la cité* ».

JACQUES-MARIE BARDINTZEFF

Volcanologue professeur à l'Université Paris-Sud Orsay. Il nous présentera les volcans d'Islande et leurs éruptions, les geysers et la géothermie, les paysages étonnants. Il nous expliquera comment des volcans prennent naissance au fond des océans puis émergent en îles. Dernier ouvrage paru : « *Volcanologue* ».

Avec
OLIVIER LASCAR

Rédacteur en chef du pôle digital de Sciences et Avenir
Pendant la croisière l'œil de Lascar restera ouvert, pertinent et... impertinent !

Une occasion exceptionnelle de larguer les amarres pour vivre neuf belles journées d'évasion entre ciel et terre. Des journées denses, rythmées par les nombreux plaisirs de la vie à bord, de passionnantes conférences et des rencontres avec des compagnons de voyage partageant les mêmes motivations et les mêmes curiosités.
Et bien sûr les excursions à la découverte de ces terres septentrionales aux somptueux paysages dont vous garderez un souvenir inoubliable !

IM-**-***-**

RENSEIGNEMENTS ET RÉSERVATIONS : **PLEIN CAP « Croisière du Savoir »**
CROISIÈRES PLEIN CAP : **251 ROUTE DE LA COLLE - 06270 VILLENEUVE-LOUBET - info@plein-cap.com - Tél. 04 93 20 21 20**
Programme complet, renseignements et inscriptions sur le site web : croisiere-du-savoir.fr

CROISIÈRE

Antarctique, le paradis blanc

Exploration au cœur de l'empire des manchots

Du 2 au 15 novembre 2020

Sylvain Mahuzier - *Guide polaire et naturaliste*

À bord du *World Explorer* (86 cabines)

Manchots Adélie - Antarctique

Cap sur l'**Antarctique**, le paradis blanc ! À bord du World Explorer (86 cabines) et aux côtés de 5 guides d'expédition francophones, dont **Sylvain Mahuzier** (guide polaire et naturaliste), vous visiterez la péninsule, continent de l'extrême, grand comme 25 fois la France et couvert à 99 % de glace. Vous pourrez admirer la splendeur des **montagnes glacées** s'enfonçant dans l'océan et des **terres immaculées** qui abritent des millions de **manchots**, des **phoques** ou des **éléphants de mer**.

OFFRE SPÉCIALE - **1 500 €/pers.** pour toute réservation avant le 31 janvier 2020 (code REVE)

soit la croisière à partir de ~~13 990 €~~ **12 490 €/pers.*** au départ de Paris à bord du *World Explorer*

* Vols depuis Paris, pension complète, boissons (sélection), excursions, conférences et taxes inclus.
Départ de province possible : nous consulter.

Demandez la brochure au **01 75 77 87 48**, par e-mail à contact@croisieres-exception.fr, sur www.croisieres-exception.fr/brochures (code **SAANT** à renseigner) ou chez votre agence de voyages habituelle.

Croisières d'exception

S'enrichir de la beauté du monde

* Se référer à la brochure pour le détail des prestations et les conditions générales de vente. Licence n° IM075150063. Les conférenciers seront présents sauf en cas de force majeure. Crédits photos : © iStock, © Grands Espaces et © Croisières d'exception. Création : nuitdepleineluneline.fr